



Universidad de Oviedo
Departamento de Energía

Tesis Doctoral
Gijón 2014



Programa de Doctorado:
Tecnología, Diversificación, Calidad y Ahorro Energético

Propulsión Eléctrica Marina con Cero Emisiones mediante el empleo de una Pila de Combustible de Hidrógeno tipo PEM (membrana de intercambio de protones)



Tesis Doctoral
Gijón 2014

Lauraño Balbóna Calvo



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Propulsión Eléctrica Marina con Cero Emisiones mediante el empleo de una Pila de Combustible de Hidrógeno de tipo PEM (membrana de intercambio de protones)	Inglés: Marine Electric Propulsion Zero Emission through the use of a Fuel Cell Hydrogen PEM (proton exchange membrane)
2.- Autor	
Nombre: Laureano Balbona Calvo	:
Programa de Doctorado: "Tecnología, Diversificación, Calidad y Ahorro Energético" (Mención de Calidad)	
Órgano responsable: Departamento de energía	

RESUMEN (en español)

En la presente tesis doctoral, se realizó la integración de un sistema de generación de energía híbrido, para la propulsión y alimentación de los sistemas auxiliares en una embarcación, denominada "Barco 00", que puede ser propulsada por un motor diesel o por un motor eléctrico, y a la cual se le ha incorporado una pila de combustible con tecnología de hidrógeno de baja temperatura PEM (membrana polimérica de intercambio de protones), que junto con dos paneles fotovoltaicos y un alternador acoplado al motor diesel, generan la energía eléctrica necesaria para la propulsión eléctrica y la alimentación de los equipos auxiliares de la embarcación.

Para llegar a esto, en un primer momento, se realizó un estudio del tipo de pila de combustible más adecuado para esta aplicación. Una vez definido el tipo de pila de combustible a emplear, se diseñó y construyó en el laboratorio un banco de pruebas, que se asemejase lo más posible a una línea de propulsión de una embarcación real, incluyendo un pequeño depósito con agua para reproducir los esfuerzos y las resistencias a los que se encuentra sometida la hélice de una embarcación durante la navegación.

En este banco de pruebas, se realizaron tres bloques de ensayos, que nos permitieron obtener las curvas características de la pila y comparar los resultados, con los facilitados por el fabricante y los obtenidos con el software de la propia pila, a la vez que se estudió la duración y las características de las distintas fases de funcionamiento de la pila y se establecieron los protocolos de parada y arranque de la misma.

En una segunda parte de la tesis, se utilizó de una embarcación, sobre la que se planificaron y ejecutaron las modificaciones necesarias para la integración del sistema de propulsión híbrida diesel-eléctrica, a la vez que se construyó y ensayó un sistema de gestión de potencia, que controla de forma centralizada en un panel de mando, los flujos de energía entre los sistemas eléctricos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica integrados en la embarcación.

Finalmente, una vez se integró y optimizó el funcionamiento de todo el sistema en la embarcación, se realizó el transporte y puesta a flote de la misma, así como las pruebas de navegación con el sistema completo de propulsión, estableciendo la viabilidad del proyecto.



RESUMEN (en Inglés)

In the current doctoral thesis the integration of an hybrid- energy generation system for the propulsion and supply of the auxiliary system in vessel called "00 ship" has been carried out. It can be powered by a diesel engine or by an electrical engine in which a fuel hydrogen technology with a low temperature PEM (a protons exchange polymeric membrane) has been applied. This, together with two photovoltaic panels and an alternator attached to the diesel engine, generate the necessary electricity for the propulsion an supply of the auxiliary equipments of the ship.

To get to this point, firs of all, a study of the most convenient fuel battery system to be used for this application, was performed. Once the kind of combustion battery to be used was established. A test rig was designed and built in the laboratory, that was the most similar to a propulsion line of a real ship/vessel. It included a small water tank to reproduce the strength /work and resistance to which the helix of the ship is undergone along the navigation period.

In this test rig, three different tests were achieved / accomplished. With those tests we were able to obtain the characteristic map / line of the battery, and compare the results with the ones the we were provided the manufacturer and the ones obtain with the software of the battery. At the same time the duration and characteristics of the different periods of the battery functioning, and the procedures for starting and stopping it, were determined.

On the second part of the thesis, a ship was used to plan and perform the necessary modifications for the integration of hybrid-electrical-diesel propulsion system. At the same time a power management system was built and tested. This system controls the energy flows among the electrical systems of production, storage and consumption of power, integrated in the ship.

Finally, once the functioning of the system in the ship was integrated an optimized, The vessel was transported and put afloat, at the same time, the navigation tests with the complete propulsion system, established the viability of the project.



Universidad de Oviedo

Departamento de Energía

**Propulsión Eléctrica Marina con Cero Emisiones
mediante el empleo de
una Pila de Combustible de Hidrógeno tipo PEM
(membrana de intercambio de protones)**

Laureano Balbona Calvo

<< En tiempos de cambio,
quienes esten abiertos al aprendizaje
se adueñarán del futuro,
mientras que aquellos que creen saberlo todo
estarán bien equipados
para un mundo que ya no existe.>>

Eric Hoffer

Agradecimientos.

Quiero expresar mi agradecimiento en primer lugar a Julián Martínez de la Calle, sin su ayuda y conocimiento, esta tesis nunca hubiera llegado a buen fin. Así como a mis compañeros de trabajo Ángel Lobo, Pedro Revuelta y Ramón Lucio, por su colaboración y su disponibilidad para ayudarme en la realización de los ensayos, durante la realización de sus proyectos.

También quiero agradecer el trabajo y la colaboración llevada a cabo por los componentes de la empresa Biogas Fuell Cell S.A., en especial a Antonio Domínguez Padilla Director I+D y a Alfredo Martín Benito, Jefe de proyecto de hidrógeno y pilas de combustible.

Otro de los pilares para la realización de esta tesis ha sido el Astillero La Venecia, al mando de Emilio Pérez García, sus conocimientos, experiencia, destreza y dedicación, así como la de todos sus empleados en la construcción de barcos ha sido básica, para llevar a buen puerto el diseño, construcción y adaptación de la embarcación a los fines requeridos.

Por último y no menos importante, quiero agradecer a toda mi familia los logros alcanzados. En especial a mis padres Laureano y M^a Luisa, por haberme impulsado y animado a lo largo de toda mi educación y a mi mujer, Mercedes, por su paciencia soportando mis frustraciones y por todo el tiempo que no le he podido dedicar mientras me encontraba trabajando en la tesis.

A todos ellos, les mando mi más cariñoso agradecimiento y les dedico esta tesis.

Resumen.

En la presente tesis doctoral, se realizó la integración de un sistema de generación de energía híbrido, para la propulsión y alimentación de los sistemas auxiliares en una embarcación, denominada "Barco 00", que puede ser propulsada por un motor diesel o por un motor eléctrico, y a la cual se le ha incorporado una pila de combustible con tecnología de hidrógeno de baja temperatura PEM (membrana polimérica de intercambio de protones), que junto con dos paneles fotovoltaicos y un alternador acoplado al motor diesel, generan la energía eléctrica necesaria para la propulsión eléctrica y la alimentación de los equipos auxiliares de la embarcación.

Para llegar a esto, en un primer momento, se realizó un estudio del tipo de pila de combustible más adecuado para esta aplicación. Una vez definido el tipo de pila de combustible a emplear, se diseñó y construyó en el laboratorio un banco de pruebas, que se asemejase lo más posible a una línea de propulsión de una embarcación real, incluyendo un pequeño depósito con agua para reproducir los esfuerzos y las resistencias a los que se encuentra sometida la hélice de una embarcación durante la navegación.

En este banco de pruebas, se realizaron tres bloques de ensayos, que nos permitieron obtener las curvas características de la pila y comparar los resultados, con los facilitados por el fabricante y los obtenidos con el software de la propia pila, a la vez que se estudió la duración y las características de las distintas fases de funcionamiento de la pila y se establecieron los protocolos de parada y arranque de la misma.

En una segunda parte de la tesis, se utilizó de una embarcación, sobre la que se planificaron y ejecutaron las modificaciones necesarias para la integración del sistema de propulsión híbrida diesel-eléctrica, a la vez que se construyó y ensayó un sistema de gestión de potencia, que controla de forma centralizada en un panel de mando, los flujos de energía entre los sistemas eléctricos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica integrados en la embarcación.

Finalmente, una vez se integró y optimizó el funcionamiento de todo el sistema en la embarcación, se realizó el transporte y puesta a flote de la misma, así como las pruebas de navegación con el sistema completo de propulsión, estableciendo la viabilidad del proyecto.

Abstract.

In the current doctoral thesis the integration of an hybrid- energy generation system for the propulsion and supply of the auxiliary system in vessel called “00 ship” has been carried out. It can be powered by a diesel engine or by an electrical engine in which a fuel hydrogen technology with a low temperature PEM (a protons exchange polymeric membrane) has been applied. This, together with two photovoltaic panels and an alternator attached to the diesel engine, generate the necessary electricity for the propulsion an supply of the auxiliary equipments of the ship.

To get to this point, firs of all, a study of the most convenient fuel battery system to be used for this application, was performed. Once the kind of combustion battery to be used was established. A test rig was designed and built in the laboratory that was the most similar to a propulsion line of a real ship/vessel. It included a small water tank to reproduce the strength /work and resistance to which the helix of the ship is undergone along the navigation period.

In this test rig, three different tests were achieved / accomplished. With those tests we were able to obtain the characteristic map/ line of the battery, and compare the results with the ones the we were provided the manufacturer and the ones obtain with the software of the battery. At the same time the duration and characteristics of the different periods of the battery functioning, and the procedures for starting and stopping it, were determined.

On the second part of the thesis, a ship was used to plan and perform the necessary modifications for the integration of hybrid-electrical-diesel propulsion system. At the same time a power management system was built and tested. This system controls the energy flows among the electrical systems of production, storage and consumption of power, integrated in the ship.

Finally, once the functioning of the system in the ship was integrated an optimized, The vessel was transported and put afloat, at the same time, the navigation tests with the complete propulsion system, established the viability of the project.

Índice.

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	III
Índice	IV
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	XIV
Capítulo 1.- Introducción.	
1.1.- Objetivos.....	3
1.2.- Metodología.....	4
1.3.- Estructura de la memoria.....	6
Capítulo 2.- El Hidrógeno.	
2.1.- Introducción.....	7
2.2.- Propiedades Físicas.....	8
2.2.1.- Características del hidrógeno, que hacen peligroso su uso.....	8
2.2.2.- Densidad, volumen y peso específico.....	9
2.2.3.- Punto de fusión y ebullición.....	10
2.2.4.- Relación de expansión.....	11
2.3.- Propiedades Químicas.....	12
2.3.1.- Reactividad.....	12
2.3.2.- Energía.....	14
2.3.3.- Inflamabilidad.....	16
2.4.- Métodos para la obtención del hidrógeno.....	21
2.4.1.- Reformado con vapor.....	21
2.4.2.- Oxidación parcial de combustibles fósiles con defecto de O ₂	21
2.4.3.- Electrólisis de agua.....	22
2.4.4.- Termólisis de agua.....	22
2.4.5.- Gasificación de biomasa.....	22
2.4.6.- Pirólisis de biomasa.....	22
2.5.- Sistemas de almacenamiento del hidrógeno.....	23
2.5.1.- Hidrógeno en fase gaseosa comprimido a alta presión.....	23
2.5.2.- Hidrógeno en fase líquida o criogénico.....	24
2.5.3.- Hidruros metálicos.....	27
2.5.4.- Materiales Porosos.....	28
2.5.5.- Otros sistemas de almacenamiento.....	31
2.5.6.- Ventajas e inconvenientes de los sistemas de almacenamiento....	32

Capítulo 3.- Las Pilas de Combustible.

3.1.-	Introducción.....	36
3.2.-	Principio de funcionamiento.....	37
3.2.1.-	Pila galvánica, voltaica o electroquímica.....	37
3.2.2.-	Pila de combustible.....	40
3.2.3.-	Análisis comparativo entre las pilas de combustible y las baterías.....	40
3.2.4.-	Ventajas del empleo de una pila de combustible.....	41
3.2.5.-	Inconvenientes del empleo de una pila de combustible.....	43
3.3.-	Tipos de pilas de combustible.....	46
3.3.1.-	Pilas de combustible alcalinas.....	47
3.3.2.-	Pilas de combustible de ácido fosfórico.....	49
3.3.3.-	Pilas de combustible con membrana de intercambio de protones..	51
3.3.4.-	Pilas de combustible de carbonato fundido.....	54
3.3.5.-	Pilas de combustible de oxido sólido.....	57

Capítulo 4.- La Pila de Combustible PEM.

4.1.-	La celda de combustible.....	60
4.2.-	Curvas características de la pila de combustible PEM.....	65
4.2.1.-	Curva de Polarización.....	65
4.2.2.-	Curva de Potencia.....	66
4.2.3.-	Factores que afectan a la curva de polarización.....	67
4.3.-	Eficiencia de la pila de combustible PEM.....	70
4.3.1.-	Eficiencia del stack de la pila de combustible.....	71
4.3.2.-	Eficiencia del sistema completo de la pila de combustible.....	72
4.4.-	Aplicaciones de la pila de combustible PEM.....	78
4.4.1.-	Aplicación en Sistemas de alimentación portátil.....	79
4.4.2.-	Aplicación en Plantas Estacionarias.....	79
4.4.3.-	Aplicación en el Transporte Terrestre.....	81
4.4.4.-	Aplicación en el Transporte Aéreo.....	85
4.4.5.-	Aplicación en el Transporte Marítimo.....	86

Capítulo 5.- Banco de Pruebas del Laboratorio: Diseño y Construcción.

5.1.-	Sistema de almacenamiento de hidrógeno.....	95
5.2.-	La pila de combustible PEM NEXA.....	96
5.2.1.-	Componentes y sistemas del módulo de Pila Nexa.....	97
5.2.2.-	Funcionamiento del módulo de Pila Pexa.....	101
5.3.-	Convertidor DC/DC.....	108
5.4.-	Línea de propulsión.....	113

5.4.1.-	Motor eléctrico VETUS EP 2200 K.....	114
5.4.2.-	Línea de eje y hélice.....	115
5.5.-	Línea de consumos.....	117
Capítulo 6.- Ensayos en el Banco de Pruebas del Laboratorio.		
6.1.-	Primer bloque de ensayos en el laboratorio.....	119
6.1.1.-	Ensayo con el módulo Nexa conectado a la Línea de Propulsión..	119
6.1.2.-	Ensayo con el módulo Nexa conectado a la Línea Auxiliar de Consumos.....	121
6.1.3.-	Balance de Planta.....	123
6.1.4	Análisis de resultados.....	124
6.2.-	Segundo bloque de ensayos en el laboratorio.....	126
6.2.1.-	Esquema eléctrico del circuito de lámparas.....	127
6.2.2.-	Curvas características.....	128
6.2.3.-	Análisis de resultados.....	135
6.3.-	Tercer bloque de ensayos en el laboratorio.....	136
6.3.1.-	Circuito con asociación de resistencias calibradas.....	136
6.3.2.-	Ensayos realizados con la asociación de resistencias calibradas..	141
6.3.3.-	Análisis de resultados.....	144
6.4.-	Conclusiones obtenidas de los ensayos en el laboratorio.....	145
Capítulo 7.- Aplicación de la pila PEM de combustible en una embarcación.		
7.1.-	Introducción.....	147
7.2.-	Legislación aplicable al uso del hidrógeno en el sector marítimo.....	148
7.3.-	Diseño y construcción de la embarcación.....	150
7.4.-	Línea de propulsión.....	156
7.5.-	Gestión de la potencia eléctrica.....	162
7.5.1.-	Baterías.....	163
7.5.2.-	Instalación eléctrica integrada en la embarcación.....	165
7.5.3.-	Pila de combustible PEM NEXA 1200.....	177
7.5.4.-	Pruebas y resultados experimentales con la Pila PEM NEXA 1200 en el laboratorio.....	181
7.6.-	Integración del sistema global en la embarcación.....	188
7.7.-	Pruebas de mar de la embarcación.....	190
7.7.1.-	Pruebas de estabilidad, flotabilidad y dinámicas.....	190
7.7.2.-	Pruebas de navegación con el sistema completo de propulsión....	192
7.7.3.-	Calculo del consumo de hidrógeno de la embarcación.....	194

Capítulo 8.- Conclusiones y Trabajos Futuros.

8.1.- Conclusiones.....	199
8.2.- Trabajos futuros.....	201
Referencias Bibliográficas.....	208

Índice de figuras.

Figura 1.1.-	Proyección de la demanda mundial de energía por tipo de fuente (proyección al año 2030).....	1
Figura 2.1.-	Rangos de temperatura de inflamación del Gas-oil.....	17
Figura 2.2.-	Variación de los Límites de inflamabilidad con la temperatura.....	18
Figura 2.3.-	Límites de Inflamabilidad para el hidrógeno.....	19
Figura 2.4.-	Tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido.....	23
Figura 2.5.-	Sección de un tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido.....	24
Figura 2.6.-	Diagrama de flujo de una licuefacción con preenfriamiento.....	25
Figura 2.7.-	Esquema de un tanque de hidrógeno líquido.....	26
Figura 2.8.-	Sistema de hidruro metálico.....	27
Figura 2.9.-	Nanotubos de carbono.....	29
Figura 2.10.-	Zeolitas.....	29
Figura 2.11.-	Esquema comparativo de los tanques necesarios para almacenar 6 Kg de hidrogeno en fase sólida, líquida y almacenado en sólidos carbonosos.....	34
Figura 3.1.-	Pila galvánica.....	38
Figura 3.2.-	Esquema del funcionamiento de una pila de combustible.....	40
Figura 3.3.-	Comparación de Eficiencias de distintos Sistemas de Generación de Energía Eléctrica.....	42
Figura 3.4.-	Coste de producción del hidrógeno (International Energy Agency "IEA").	44
Figura 3.5.-	Pila de Combustible Alcalina.....	47
Figura 3.6.-	Pila de Combustible de Ácido Fosfórico.....	49
Figura 3.7.-	Pila de Combustible PEM.....	51
Figura 3.8.-	Pila de Combustible de Carbonato Fundido.....	54
Figura 3.9.-	Pila de Combustible de Óxido Sólido (Diseño Tubular).....	57
Figura 4.1.-	Esquema de funcionamiento del stack de una pila de combustible PEM..	60
Figura 4.2.-	Pila de combustible PEM del fabricante Ballard.....	60
Figura 4.3.-	Ensamblaje del stack de una pila de combustible PEM.....	63
Figura 4.4.-	Curva de polarización de una pila de combustible.....	65
Figura 4.5.-	Curva de potencia de una pila de combustible.....	67
Figura 4.6.-	Variación de una curva de polarización.....	67
Figura 4.7.-	Esquema de una planta de energía con pila de combustible PEM alimentada con hidrógenoy aire.....	75
Figura 4.8.-	Esquema de una planta de energía con pila de combustible PEM alimentada con hidrógenoy oxígeno.....	76
Figura 4.9.-	Esquema de una planta de energía con pila de combustible PEM y reformador integrado.....	78

Figura 4.10.-	Esquema sistema de pila de combustible estacionario aplicado a la industria del cloro.....	80
Figura 4.11.-	Toma de repostaje del Hyundai ix35 FCVE.....	82
Figura 4.12.-	Propulsor del Toyota FCHV PEM FC.....	82
Figura 4.13.-	“Green GT H2” Vehículo de competición propulsado por una pila de combustible de hidrógeno.....	83
Figura 4.14.-	Suzuki Burgman Fuel – Cell.....	83
Figura 4.15.-	Avioneta biplaza “DIMONA”.....	85
Figura 4.16.-	Avión ANTARES DLR-H2.....	85
Figura 4.17.-	Módulo pila PEM BZM 34.....	87
Figura 4.18.-	Módulo pila PEM BZM 120.....	87
Figura 4.19.-	Estructura e imagen del Catamarán, Hydroxy 3000.....	88
Figura 4.20.-	Ubicación de los elementos que componen el sistema de propulsión en el barco de pasaje Zemships.....	89
Figura 4.21.-	Esquema de funcionamiento del sistema híbrido del Zemships.....	90
Figura 4.22.-	Barco del proyecto PROTIUM de la Universidad de Birmingham.....	91
Figura 4.23.-	Dispositivo de almacenamiento del hidrógeno en estado sólido como un hidruro metálico.....	91
Figura 4.24.-	“Nemo H2”, con propulsión pila PEM en funcionamiento en los canales de Ámsterdam.....	92
Figura 4.25.-	Barco eléctrico con propulsión híbrida en el pantano de la Cuera (Cuenca).....	92
Figura 5.1.-	Estructura del Banco de Ensayos.....	94
Figura 5.2.-	Caseta para el almacenaje de las botellas de hidrógeno.....	95
Figura 5.3.-	Panel de conexión de las botellas de H2.....	95
Figura 5.4.-	Esquema de funcionamiento del módulo NEXA.....	96
Figura 5.5.-	Componentes y sistemas del módulo de Pila NEXA.....	97
Figura 5.6.-	Sistema de suministro de hidrógeno.....	98
Figura 5.7.-	Sistema para el suministro de aire.....	99
Figura 5.8.-	Sistema de refrigeración.....	100
Figura 5.9.-	Vista posterior del banco de ensayos.....	103
Figura 5.10.-	Panel gestor de Potencia.....	104
Figura 5.11.-	Display y Seta de parada de emergencia.....	104
Figura 5.12.-	Esquema del Panel gestor de Potencia.....	105
Figura 5.13.-	Curvas de Potencia y Polarización.....	107
Figura 5.14.-	Graficas de variables relacionadas con el rendimiento del módulo Nexa..	108
Figura 5.15.-	Convertidor de 24V DC/DC BSZ-PG 1200.....	109
Figura 5.16.-	Esquema de conexión del módulo Nexa y el convertidor.....	109
Figura 5.17.-	Panel de operaciones.....	110

Figura 5.18.-	Software del convertidor DC/DC.....	111
Figura 5.19.-	Software NexaMon OEM para el módulo Nexa.....	111
Figura 5.20.-	Banco de pruebas y estructura móvil.....	113
Figura 5.21.-	Motor Vetus EP 2200 K.....	114
Figura 5.22.-	Gráfica ejemplo: Capacidad de las baterías en función de la velocidad desarrollada por el motor.....	114
Figura 5.23.-	Estructura de aluminio.....	115
Figura 5.24.-	Conjunto de eje y hélice.....	116
Figura 5.25.-	Hélice de tres palas destrógira.....	116
Figura 5.26.-	Tanque de agua.....	116
Figura 5.27.-	Convertidor DC/AC.....	117
Figura 5.28.-	Repartidor de corriente.....	117
Figura 6.1.-	Gráfica de potencia, intensidad y voltaje del stack de la pila con el tanque de agua parcialmente lleno.....	120
Figura 6.2.-	Gráfica de potencia, intensidad y voltaje del stack de la pila con el tanque de agua totalmente lleno.....	121
Figura 6.3.-	Gráfica de potencia, intensidad, voltaje, temperatura y consumo de hidrógeno del stack de la pila cuando se realiza la secuencia de consumos de la línea auxiliar.....	122
Figura 6.4.-	Gráfica de la variación de potencia, intensidad y voltaje del stack de la pila durante el ensayo de Balance de Planta.....	124
Figura 6.5.-	Esquema eléctrico del circuito con lámparas.....	127
Figura 6.6.-	Curva voltaje –intensidad.....	129
Figura 6.7.-	Curva de consumo de hidrógeno.....	130
Figura 6.8.-	Curva de Potencia. (Las curvas de la potencia teórica y la del software aparecen superpuestas).....	131
Figura 6.9.-	Curva de calor disipado obtenida experimentalmente y curva proporcionada por el manual de la pila Nexa.....	133
Figura 6.10.-	Curva de eficiencia obtenida experimentalmente y proporcionada por el manual de la pila Nexa.....	134
Figura 6.11.-	Curva de ruido obtenida experimentalmente y proporcionada por el manual de la pila Nexa.....	135
Figura 6.12.-	Resistencia 8 Ω y Potencia 91.12 W.....	138
Figura 6.13.-	Resistencia 5 Ω y Potencia 154.80 W.....	138
Figura 6.14.-	Resistencia 3 Ω y Potencia 243.00 W.....	138
Figura 6.15.-	Resistencia 1.5 Ω y Potencia 486.00 W.....	138
Figura 6.16.-	Resistencia 1 Ω y Potencia 729.00 W.....	139
Figura 6.17.-	Resistencia 0.75 Ω y Potencia 972.00 W.....	139
Figura 6.18.-	Resistencia 0.6 Ω y Potencia 1215.00 W.....	140
Figura 6.19.-	Resistencias calibradas con disipador.....	141

Figura 6.20.-	Curvas de Potencia. Primer ensayo.....	143
Figura 6.21.-	Curvas de Potencia. Segundo ensayo.....	144
Figura 7.1.-	Esquema general de la instalación.....	148
Figura 7.2.-	Aluminio naval ALCOA 5083-H111.....	151
Figura 7.3.-	Ampliación de la sentina.....	152
Figura 7.4.-	Nuevo asiento del motor diésel y soporte para el anclaje del motor eléctrico.....	152
Figura 7.5.-	Estructura fabricada sobre el guardacalor de la embarcación.....	153
Figura 7.6.-	Estructura fabricada para alojar la botella de hidrógeno.....	154
Figura 7.7.-	Construcción del soporte que aloja los paneles solares fotovoltaicos.....	155
Figura 7.8.-	Vista de la pintura de la obra viva y de la obra muerta de la embarcación.....	155
Figura 7.9.-	Motor Sólé Diésel MINI-17 + TMC40.....	156
Figura 7.10.-	Dimensiones del motor MINI-17 y la reductora TMC40.....	156
Figura 7.11.-	Curvas características del motor Sólé DIESEL MINI-17.....	157
Figura 7.12.-	Panel de control del motor Sólé DIESEL MINI-17.....	158
Figura 7.13.-	Acoplamiento elástico entre el motor diésel y el motor eléctrico.....	159
Figura 7.14.-	Motor eléctrico y placa de características.....	160
Figura 7.15.-	Dimensiones del Motor eléctrico.....	160
Figura 7.16.-	Brida de unión entre el motor eléctrico y el eje de cola.....	161
Figura 7.17.-	Salida del eje de cola por el prensaestopas de popa.....	161
Figura 7.18.-	Hélice de tres palas, antes de su tratamiento superficial en el astillero....	161
Figura 7.19.-	Hélice en el eje de cola de la embarcación.....	161
Figura 7.20.-	Ubicación de las baterías en el Barco 00.....	164
Figura 7.21.-	Esquema simplificado.....	164
Figura 7.22.-	Esquema simple de la instalación eléctrica integrada en el Barco 00.....	165
Figura 7.23.-	Esquema de conexiones del panel del motor diesel, del panel del gestor de potencia y del mando para el control del motor eléctrico integrado en el Barco 00.....	166
Figura 7.24.-	Esquema de conexiones de las baterías, el alternador acoplado al motor diesel y los interruptores cortacorrientes.....	167
Figura 7.25.-	Esquema de las conexiones eléctricas de la pila de combustible PEM NEXA 1200 y de los paneles fotovoltaicos integrados en el Barco 00.....	168
Figura 7.26.-	Esquema de las conexiones eléctricas del cargador-inversor VICTRON 24/5000, el regulador de las placas fotovoltaicos y el inversor de corriente AC MASTER 24/500 integrados en el Barco 00.....	169
Figura 7.27.-	Esquema de conexiones del variador de frecuencia YASKAWA V 1000 integradO en el Barco 00.....	170

Figura 7.28.-	Esquema de conexiones de la caja de enlace DC integrada en el Barco 00.....	171
Figura 7.29.-	Esquema de conexiones de la caja de fusibles magnetotérmicos integrada en el Barco 00.....	172
Figura 7.30.-	Caja de enlace DC.....	173
Figura 7.31.-	Regulador de corriente DC/DC de las placas fotovoltaicas.....	174
Figura 7.32.-	Repartidor de corriente de las baterías.....	174
Figura 7.33.-	Cargador-inversor Victron Energy.....	175
Figura 7.34.-	Variador de frecuencia YASKAWA V 1000. - Inversor de corriente AC MASTER 24/500.....	175
Figura 7.35.-	Interruptores cortacorrientes de los tres grupos de baterías.....	176
Figura 7.36.-	Fusibles magnetotérmicos para el control de la corriente alterna.....	176
Figura 7.37.-	Panel de mando del “Barco 00”.....	177
Figura 7.38.-	Pila PEM Nexa 1200.....	177
Figura 7.39.-	Convertidor de corriente Nexa DC1200-24.....	177
Figura 7.40.-	Configuración simplificada del sistema de pila de combustible NEXA.....	178
Figura 7.41.-	Montaje completo de modulo NEXA con convertidor DC/DC y baterías de arranque.	179
Figura 7.42.-	Software de control del sistema completo de pila de combustible NEXA..	179
Figura 7.43.-	Instalación de la pila PEM NEXA y del sistema de alimentación de hidrógeno en el laboratorio, durante los ensayos realizados.....	181
Figura 7.44.-	Imagen del software NEXA®OSC de la pila Pem Nexa 1200.....	185
Figura 7.45.-	Instalación de la pila conectada al panel de bombillas para la generación de las cargas.....	185
Figura 7.46.-	Curva de caracterización Potencia-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200.....	187
Figura 7.47.-	Curva de caracterización Tensión-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200.....	187
Figura 7.48.-	Integración de los equipos eléctricos en la estructura del guardacalor.....	188
Figura 7.49.-	Integración de la botella de hidrógeno en la estructura de almacenamiento.....	188
Figura 7.50.-	Fotografías del transporte, puesta a flote y pruebas de navegación con la embarcación.....	191
Figura 7.51.-	Curvas de caracterización Potencia-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200 obtenida en el laboratorio y en las pruebas de mar.....	193
Figura 7.52.-	Curva de caracterización Tensión-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200 obtenida en el laboratorio y en las pruebas de mar.....	194
Figura 7.53.-	Consumo de H2 teórico de la pila de combustible, frente a potencia de la pila.....	195

Figura 7.54.- Consumo de H ₂ de la pila de combustible, durante las pruebas de mar realizadas con la embarcación.....	195
Figura 8.1.- Orificio practicado en el guardacalor para mejorar el acceso a la caja de enlace DC.....	201
Figura 8.2.- Nueva disposición de la caja de enlace DC en el guardacalor.....	201
Figura 8.3.- Nueva disposición de las conexiones de las baterías, del Gestor de Potencia y del mando de control del motor eléctrico.....	202
Figura 8.4.- Disposición de la Caja de Fusibles Magnetotérmicos.....	204
Figura 8.5.- Estructura de la caja de conexiones DC- Link.....	205
Figura 8.6.- Nueva disposición de las conexiones del cargador inversor, del sistema de energía solar, de la pila de combustible PEM y del variador de corriente.....	206

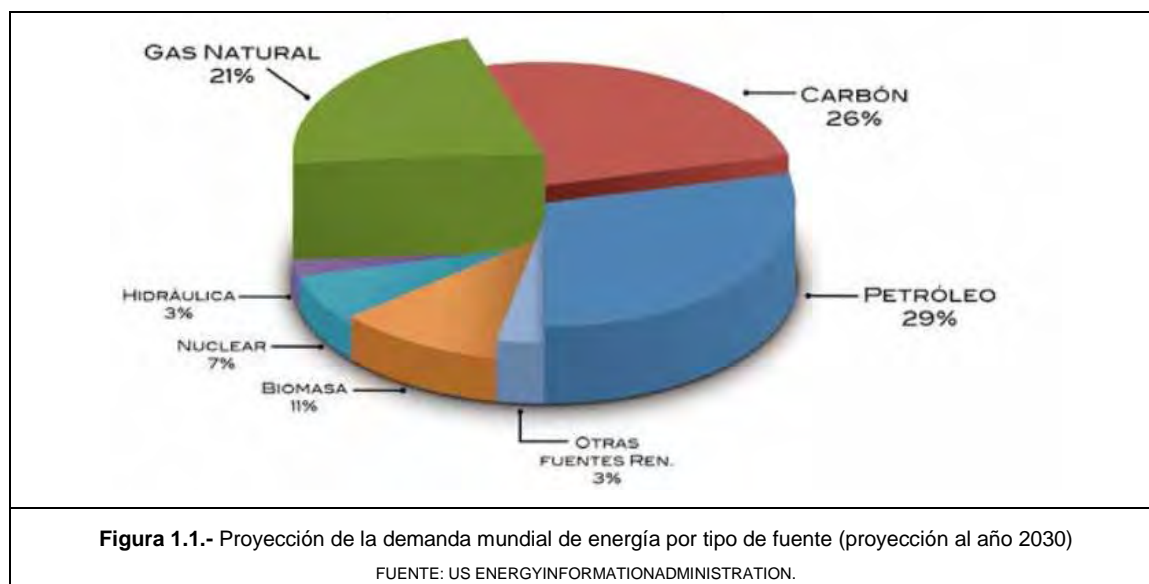
Índice de tablas.

Tabla 2.1.-	Comparativa de poderes caloríficos de distintos combustibles a 25°C y 1 atm.....	14
Tabla 2.2.-	Densidad de Energía de varios combustibles.....	16
Tabla 2.3.-	Comparativa del Punto de Inflamación de distintos Combustibles.....	17
Tabla 2.4.-	Límites de inflamabilidad.....	18
Tabla 2.5.-	Temperaturas de auto ignición.....	20
Tabla 2.6.-	Capacidades de almacenamiento de hidrógeno de las diferentes tecnologías.....	33
Tabla 5.1.-	Variables controladas por el sistema de control del módulo NEXA.....	101
Tabla 5.2.-	Valores del Display digital.....	110
Tabla 5.3.-	Modos de trabajo del convertidor DC/DC.....	112
Tabla 6.1.-	Variación de velocidad de la hélice.....	119
Tabla 6.2.-	Secuencia de conexiones de la línea de consumos.....	122
Tabla 6.3.-	Valores de Potencia, intensidad y tensión en diferentes puntos del Banco de Pruebas.....	124
Tabla 6.4.-	Comparación de los valores de tensión de salida teóricos, con los obtenidos en el software NexaMon y los obtenidos con nuestros instrumentos de medida.....	129
Tabla 6.5.-	Comparación de los valores de consumo de hidrógeno teóricos, con los obtenidos en el software NexaMon.....	130
Tabla 6.6.-	Comparación de los valores de potencia teóricos, con los obtenidos en el software NexaMon y los obtenidos con nuestros instrumentos de medida.....	132
Tabla 6.7.-	Comparación de los valores de potencia teórica, potencia en el software NexaMon y potencia obtenida con nuestros instrumentos de medida, en función del número de bombillas en funcionamiento.....	132
Tabla 6.8.-	Comparación de los valores de calor disipado proporcionados por el manual de la pila Nexa y los obtenidos de manera experimental.....	133
Tabla 6.9.-	Comparación de los valores de eficiencia proporcionados por el fabricante y los obtenidos experimentalmente.....	134
Tabla 6.10.-	Comparación de los valores de ruido proporcionados por el fabricante y los obtenidos experimentalmente.....	135
Tabla 6.11.-	Valor de las resistencias necesarias para generar las diferentes cargas.	137
Tabla 6.12.-	Valores de potencia para las resistencias del laboratorio.....	137
Tabla 6.13.-	Valores de intensidad y voltaje de las asociaciones de resistencias calibradas.....	142
Tabla 6.14.-	Valor de la potencia para las cargas de las asociaciones de resistencias calibradas.....	142

Tabla 6.15.-	Valores de intensidad y voltaje de las asociaciones de resistencias calibradas.....	143
Tabla 6.16.-	Valor de la potencia para las cargas de las asociaciones de resistencias calibradas.....	144
Tabla 7.1.-	Características generales del motor Sóle DIESEL MINI-17.....	158
Tabla 7.2.-	Modo de operación de la Pila NEXA 1200.....	181
Tabla 7.3.-	Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200 sometida a diferentes cargas, partiendo de una temperatura inicial de arranque de la misma igual a la ambiente.....	186
Tabla 7.4.-	Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200, sometida a diferentes cargas, partiendo de una temperatura inicial de arranque de la misma superior a la ambiente.....	186
Tabla 7.5.-	Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200 conectada directamente al motor eléctrico, durante el incremento de velocidad del mismo.....	193
Tabla 7.6.-	Curva de consumo de hidrógeno teórica.....	194
Tabla 7.7.-	Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200 conectada directamente al motor eléctrico, durante el incremento de velocidad del mismo.....	195
Tabla 7.8.-	Tabla de consumos y autonomía, en función de la potencia generada por la pila PEM.....	197

Capítulo 1: Introducción.

En la actualidad, el modelo mundial energético se basa fundamentalmente en el consumo de combustibles fósiles, pero debido fundamentalmente a la crisis existente en el mercado del petróleo y a los cada vez más evidentes efectos medioambientales, está tomando un nuevo rumbo.



Se estima que las reservas de combustibles fósiles (petróleo y gas natural) podrían verse agotadas, antes de finalizar el siglo XXI, pero además debemos tener en cuenta otros factores como son los altos precios energéticos, la contaminación ambiental y el calentamiento global asociado a las emisiones de efecto invernadero. Además, se estima que la demanda mundial de energía se incrementa en el periodo 2013-2030 en un 32 %, según estadísticas internacionales registradas por la Agencia Internacional de Energía (AIE, siglas de "US Energy Information Administration"). En la figura 1.1, se muestra una gráfica con la proyección de la demanda mundial de energía por tipo de fuente para el año 2030, reduciéndose el consumo de petróleo de un 33% (2012) a un 29% (2030) y se incorporan otras fuentes de energía como la biomasa con un 11%, para llegar a alcanzar una participación de fuentes de energía primarias renovables del 17%.

Por tanto, la tendencia a nivel mundial es buscar la reducción del uso de combustibles fósiles como fuente primaria de energía, en favor de otro tipo de energías más limpias, con menor emisión de gases de efecto invernadero, con las que poder hacer frente a los efectos del cambio climático, contribuyendo así a la reducción de la contaminación ambiental.

Los objetivos marcados por la Unión Europea para actuar contra el cambio climático, se han fijado en elevar el 20% el consumo de energías renovables, a la vez que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% para el año 2020.

Uno de los objetivos de la sociedad actual, es la búsqueda de nuevos sistemas energéticos que satisfagan a precios asequibles las demandas de esta sociedad, reduciendo los agentes contaminantes y asegurando el suministro energético.

En el sector naval, se estima que las emisiones de los barcos aumentarán en un 30% de aquí al año 2020 si no se toman medidas. Actualmente, las acciones que se están llevando a cabo para disminuir estas emisiones, están enfocadas a conseguir un mayor ahorro energético, mediante la mejora del diseño de los buques y su equipamiento, lo cual indudablemente conducirá a una disminución del consumo de combustibles fósiles. No obstante, esto no va a ser suficiente debido a las medidas medioambientales cada vez más estrictas de los gobiernos, que implican que las tecnologías convencionales de producción de energía a bordo y los combustibles actualmente empleados a bordo no serán capaces de cumplir esta normativa. Por lo tanto, va a ser necesaria la introducción de nuevas energías como alternativa a los combustibles convencionales.

Es por esto por lo que se ha planteado realizar el estudio de la aplicación del hidrógeno (debido a su abundancia y características), como energía de propulsión en una embarcación. Más concretamente la aplicación de una pila PEM (Membrana de Intercambio de Protones). Las pilas de combustible alimentadas con hidrógeno surgen como una alternativa eficiente, energética y medioambientalmente, a los sistemas tradicionales de generación de electricidad. Estas se emplean tanto en plantas estacionarias como para el transporte en general, siendo en este último caso el tamaño y el peso de la pila, así como los tiempos de respuesta rápidos y los tiempos de puesta en marcha reducidos factores críticos.

Las pilas de combustible son equipos electroquímicos que convierten directamente la energía química de un combustible en energía eléctrica. Esto implica una elevada eficiencia del proceso, gracias al gran desarrollo que se ha producido de la tecnología de las pilas de combustible en los últimos años, a la vez que se genera un bajo impacto medioambiental. En concreto, las emisiones contaminantes de las pilas de combustible que emplean directamente hidrógeno como fuente de combustible son nulas en el punto de aplicación.

Es en este contexto donde surge la elaboración de esta tesis, gracias a la colaboración entre el Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, la empresa Biogas Fuel Cell S.A. (BFC) y Astilleros La Venecia S.L., para investigar la implantación y utilización de una pila de combustible para la propulsión de una embarcación.

1.1.- OBJETIVOS.

El objetivo de esta tesis doctoral es demostrar la viabilidad del hidrógeno y de las pilas de combustible PEM como alternativa eficiente, energética y medioambientalmente, a los sistemas tradicionales de propulsión y generación de electricidad existentes en el sector marítimo. Para ello se pretende integrar una pila de combustible de hidrógeno de tipo PEM (Membrana de Intercambio de Protones) como energía para la propulsión eléctrica marina de una embarcación con cero emisiones.

En cuanto a los objetivos más específicos se pueden destacar:

- El diseño y construcción en el laboratorio de un Banco de pruebas que nos permitiese simular de la manera más real posible los diferentes ensayos realizados dentro del laboratorio. Este banco de pruebas está constituido por un motor eléctrico de corriente continua alimentado por una pila de combustible PEM, el cual hace girar una hélice marina a través de un eje. La hélice a su vez se encuentra sumergida dentro de un pequeño depósito, de manera que nos permite simular los efectos de esta cuando se encuentra sumergida en el agua.
- Obtener y analizar las curvas características de polarización de la pila de combustible PEM en el banco de pruebas del laboratorio, antes de su implementación en la embarcación.
- Adquirir conocimiento acerca de la legislación aplicable a la integración marítima de tecnologías de hidrógeno.
- Planificar y ejecutar las modificaciones de la embarcación necesarias para la posterior integración del sistema de propulsión basado en la pila de combustible.
- Desarrollar un gestor de potencia que permita al usuario un control centralizado de la energía eléctrica producida por la pila de combustible, así como de los sistemas adicionales de carga (placas fotovoltaicas y alternador) y su distribución a los diferentes consumos.
- Integrar en la embarcación adaptada el sistema de propulsión y generación energética auxiliar desarrollado en el laboratorio.
- Validación del sistema de propulsión y generación energética desarrollado mediante las pruebas realizadas en condiciones reales de navegación.

1.2.- METODOLOGÍA.

La metodología a seguir va a ser progresiva, de manera que podamos ir subsanando los diferentes problemas que se nos presenten en el prototipo del laboratorio, para poder plasmar finalmente con unas ciertas garantías todo el sistema de propulsión en la embarcación real que pretendemos propulsar con este sistema.

Antes de llevar a cabo el estudio experimental, se realizará un estudio de las características y aplicaciones de las pilas de combustible PEM existentes en el mercado. Para posteriormente diseñar y construir un banco de pruebas, donde se realizarán los ensayos divididos en tres bloques.

En el primer bloque de ensayos en el banco de pruebas, se someterá a la pila NEXA (modelo de los fabricantes Heliocentrics-Ballard) a diversas cargas: en un primer momento, alimentando la línea de propulsión, posteriormente se conectará a la línea auxiliar de consumos y finalmente alimentará a ambos sistemas a la vez; y se procederá al análisis de los resultados obtenidos.

En el segundo bloque de ensayos, se diseñara y fabricara un circuito eléctrico de asociación de cargas (lámparas), que conectado al módulo Nexa de la pila de combustible, nos permitirá hacerla trabajar con diferentes demandas de carga, obteniendo a través de su software y de los equipos de medición, sus curvas características de polarización y compararlas con las suministradas por el fabricante.

En el tercer bloque de ensayos, se emplearan resistencias calibradas para obtener la curva de potencia del stack de la pila de combustible Nexa y compararla con la obtenida a la salida del regulador DC/DC y la obtenida con nuestros instrumentos de medida (amperímetro y voltímetro).

Para finalizar, se analizarán los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio con el banco de pruebas y se plasmarán las conclusiones obtenidas.

En una segunda parte, se recopilará la normativa existente en relación a la integración de la tecnología de hidrógeno en embarcaciones. En base a esta legislación y a la experiencia adquirida en el desarrollo de proyectos previos, se evaluarán y realizarán las modificaciones que se realizarán en la embarcación, que nos permitan la integración del nuevo sistema de generación energética basado en pilas de combustible PEM alimentadas con hidrógeno

Paralelamente a esto, se diseñara, construirá y ensayará un gestor de potencia que controla de forma centralizada en un panel de mando, los flujos de energía entre los sistemas

eléctricos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica integrados en la embarcación. Al mismo tiempo, se realizarán en el laboratorio los ensayos y se establecerán los protocolos de funcionamiento, parada y arranque de la nueva pila PEM Nexa que irá incorporada a la embarcación y se obtendrán las curvas de potencia-intensidad y tensión intensidad, generadas por el software de la pila.

Posteriormente, se llevará a cabo la integración del sistema de propulsión basado en hidrógeno, el sistema fotovoltaico y el gestor de potencia centralizado, para el control y la distribución de la energía entre los distintos elementos.

A continuación, se realizarán las pruebas de estabilidad, flotabilidad y dinámicas, para comprobar el correcto funcionamiento del motor diesel, así como las pruebas de navegación. En un primer momento, se operará con la configuración eléctrica más sencilla consistente en las baterías de propulsión-motor eléctrico y se llevarán a cabo ensayos para comprobar el funcionamiento de las distintas fuentes primarias de generación energética. También se llevarán a cabo ensayos de alimentación directa de la pila de combustible a la línea del motor eléctrico sin el paso por baterías. Con los datos obtenidos durante las pruebas de mar, se elaborarán las curvas de potencia y consumo de la embarcación.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos y se extraerán las conclusiones finales, que permitan realizar la memoria final.

1.3.- ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.

La memoria se ha estructurado en siete capítulos estructurados:

- Capítulo 1. Introducción, objetivos y metodología.
- Capítulo 2. Propiedades físicas y químicas del hidrógeno. Se estudian los diferentes sistemas de almacenamiento, así como los métodos empleados para la obtención del hidrógeno.
- Capítulo 3. Principio de funcionamiento de las pilas de combustible y los diferentes tipos. Se describen las pilas de combustible alcalinas, de ácido fosfórico, con membrana de intercambio de protones, de carbonato fundido y de óxido sólido.
- Capítulo 4. Descripción de la pila de combustible de membrana de intercambio de protones. Se muestran las curvas de polarización y se estudia la eficiencia del stack y del sistema completo de la misma. También se estudian las aplicaciones de este tipo de pila de combustible en sistemas portátiles, plantas estacionarias y en el transporte.
- Capítulo 5. Diseño y construcción del banco de pruebas del laboratorio. Integración, descripción, características y funcionamiento de los equipos que lo forman.
- Capítulo 6. Ensayos experimentales realizados en el banco de ensayos del laboratorio con la pila de combustible PEM. Están divididos en tres ensayos, realizados sometiendo la pila de combustible a diferentes cargas externas, que nos permiten obtener las curvas características de la misma y comprobar su funcionamiento para las diferentes condiciones.
- Capítulo 7. Construcción y diseño de la embarcación, para la posterior integración de la línea de propulsión, la pila de combustible y los equipos que forman el gestor de potencia, en función a la legislación aplicable al uso del hidrógeno en el sector marino. Descripción, características y funcionamiento de los equipos integrados. Pruebas y resultados experimentales obtenidos en el laboratorio y en las pruebas de mar.
- Capítulo 8. Conclusiones más relevantes del trabajo realizado y sugerencias sobre posibles líneas de investigación futuras.

Capítulo 2: El Hidrógeno.

2.1.- INTRODUCCIÓN.

El hidrógeno es el átomo más ligero y simple de todos los elementos del sistema periódico, con número atómico 1 y peso atómico 1,00794 g/mol. Su nombre viene del latín "hydrogenium", y éste del griego antiguo "ἵδωρ" (hydor: agua) y "γενέσθαι" (genos: generador) cuya traducción es: "Generador de agua".

En 1766, Henry Cavendish (1731-1810) físico y químico británico, fue el primero en reconocer el hidrógeno gaseoso como una sustancia discreta, identificando el gas producido en la reacción metal-ácido como "aire inflamable" y descubriendo que la combustión del gas generaba agua. Tradicionalmente se le considera el descubridor de este elemento. Cavendish tropezó con el hidrógeno cuando experimentaba con ácidos y mercurio. Aunque asumió erróneamente que el hidrógeno era un componente liberado por el mercurio y no por el ácido, fue capaz de describir con precisión varias propiedades fundamentales del hidrógeno.

No obstante, fue T. Von Hohenheim (más conocido como Paracelso, 1493-1541) quien describió formalmente el hidrógeno diatómico gaseoso, H_2 , que lo obtuvo artificialmente mezclando metales con ácidos fuertes. Paracelso no era consciente de que el gas inflamable generado en estas reacciones químicas estaba compuesto por un nuevo elemento químico, y no fue hasta 1671, en que Robert Boyle redescubrió y describió la reacción que se producía entre limaduras de hierro y ácidos diluidos, los cuales generaban hidrógeno gaseoso.

Finalmente, en 1783 Antoine Lavoisier (1743-1794), químico, biólogo y economista francés, fue quien dio al elemento el nombre de hidrógeno, cuando comprobó junto a Pierre-Simon Laplace (1749-1827), astrónomo, físico y matemático francés, el descubrimiento de Cavendish.

El hidrógeno es el más simple de todos los elementos y se describe como una nube probabilística alrededor del núcleo por la que orbita el electrón. Es con mucho, el elemento más abundante en el universo suponiendo más del 75 % de la masa de toda la materia visible del universo. A pesar de esto no constituye directamente un combustible aprovechable, y por lo tanto, no es una fuente de energía sino un vector energético, es decir, un portador de energía.

La mayor parte de los átomos de hidrógeno, tienen el núcleo formado por un solo protón (de carga positiva y 1800 veces más pesado que un electrón), pero también existen átomos de hidrógeno que contienen en el núcleo un protón y un neutrón (sin carga eléctrica). A este isótopo de hidrógeno se le denomina deuterio o hidrógeno pesado. Además del mencionado, existen otros isótopos de hidrógeno, como el tritio que contiene dos neutrones y un protón. Estos isótopos son inestables.

Los átomos individuales de hidrógeno son eléctricamente neutros, ya que las cargas asociadas al protón y al electrón de cada átomo de hidrógeno, se anulan entre si. El tamaño del átomo, queda definido por el radio de la orbita del electrón aproximadamente 100.000 veces más grande que el radio del núcleo. La distribución de un solo electrón orbitando alrededor de un núcleo es altamente reactiva. Por esta razón, los átomos de hidrógeno se combinan en pares formando moléculas (H₂) de manera natural.

2.2.- PROPIEDADES FÍSICAS

2.2.1.- Características del hidrógeno, que hacen peligroso su uso.

En condiciones normales de presión y temperatura el hidrógeno es un gas diatómico de fórmula H₂, no tóxico y muy inflamable (sobre todo en contacto con flúor y cloro), incoloro e inodoro (una corriente de hidrógeno proveniente de una fuga es casi invisible a la luz del día). Tiene una densidad de 0,0899 kg/Nm³ (el aire es 14,4 veces más pesado, 1,2 kg/m³), un punto de ebullición normal de tan sólo 20,27 K (-252,88 °C) y un punto de fusión de 14,02 K (-259,13 °C).

El hidrógeno que se deriva del reformado de otros combustibles fósiles, está típicamente acompañado por nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases. En general, todos estos gases son también inodoros, incoloros e insípidos.

Los compuestos como los mercaptanos que se utilizan para dar olor al gas natural no pueden ser añadidos al hidrógeno que se destina para el uso en celdas de combustible, ya que contienen azufre que envenenaría las celdas.

El hidrógeno no es tóxico, pero puede actuar como un simple asfixiante desplazando el oxígeno en el aire. Los niveles de oxígeno inferiores al 19,5% son biológicamente inactivos para los seres humanos. Si se produce una deficiencia de oxígeno los efectos que se producen pueden ser detectados a través de síntomas como son una respiración rápida, disminución de la agudeza mental, deterioro de la coordinación muscular, juicio defectuoso, la depresión de todas las sensaciones, inestabilidad emocional y fatiga. Si continua la deficiencia de oxígeno aparecerán mareos, náuseas, vómitos y posible pérdida de la conciencia, pudiendo llevar eventualmente a producir convulsiones, coma y muerte. En concentraciones que se encuentren por debajo del 12%, se producirá una inmediata pérdida del conocimiento que se puede producir sin previo aviso ni síntomas.

En un volumen cerrado, pequeñas fugas de hidrógeno, no suponen un peligro de asfixia, mientras que las fugas de gran tamaño pueden ser un grave problema, ya que el hidrógeno se

difunde rápidamente para llenar el volumen. El potencial de asfixia en zonas sin confinamiento es casi insignificante, debido a la gran flotabilidad y difusividad que presenta el hidrógeno.

Sin embargo, las moléculas de gas de hidrógeno son más pequeñas que todas las de los demás gases, y se pueden difundir a través de muchos materiales considerados herméticos o impermeables a otros gases. Esta propiedad hace que el hidrógeno sea más difícil de contener que otros gases.

Las fugas de hidrógeno líquido se evaporan muy rápidamente ya que el punto de ebullición del hidrógeno líquido, como veremos más adelante, es extremadamente bajo. Las fugas de hidrógeno son peligrosas ya que se plantea un riesgo de incendio donde se mezclan con el aire. Sin embargo, el pequeño tamaño de la molécula de hidrógeno que aumenta la probabilidad de una fuga, también hace que el hidrógeno posea alta flotabilidad y difusividad, por lo que el hidrógeno fugado se eleva y se diluye con rapidez, especialmente al aire libre. En cambio, las fugas de gas se extienden lateralmente y se evaporan lentamente, lo que resulta en un persistente peligro de incendio generalizado. El gas propano es más denso que el aire por lo que se acumula en puntos bajos y se dispersa lentamente, dando lugar a un incendio prolongado o a una explosión. El gas metano es más ligero que el aire, pero no tan flotante como el hidrógeno, por lo que se dispersa rápidamente, pero no tan rápido como el hidrógeno.

Para pequeñas fugas de hidrógeno, la flotabilidad y los efectos de difusión en aire son a menudo eclipsados por la presencia de corrientes de aire. En general, estas corrientes sirven para dispersar el hidrógeno fugado aún más rápidamente con una nueva reducción de cualquier riesgo de incendio asociado. Cuando se utiliza como combustible para vehículos, la propensión a fugas del hidrógeno requiere especial atención en el diseño del sistema de combustible para asegurar que las fugas puedan dispersarse con un mínimo de obstáculos, y haciendo uso de equipos de detección de fugas en el vehículo y dentro de las instalaciones de mantenimiento.

2.2.2.- Densidad, volumen y peso específico.

La densidad se mide como la cantidad de masa contenida por unidad de volumen. El hidrógeno tiene muy baja densidad, ya que su peso atómico es menor que el de cualquier otra sustancia y por lo tanto tiene muy baja densidad, tanto cuando se encuentra en estado gaseoso como cuando se encuentra en estado líquido. La densidad sólo tiene sentido a una determinada temperatura y presión, ya que ambos parámetros afectan a la compacidad de la disposición molecular, especialmente en un gas.

El volumen específico expresa la cantidad de volumen por unidad de masa. En el caso del hidrógeno, su volumen específico como gas es 11,9 m³/kg en condiciones normales (20 °C y 1 atm), y como líquido es 0,014 m³/kg a -253 °C y 1 atm.

El peso específico de una sustancia, se obtiene relacionando la densidad de esta, con la de una sustancia de referencia, ambas a la misma temperatura y presión.

Para los vapores, el aire (con una densidad de $1,203 \text{ kg/m}^3$) es utilizado como sustancia de referencia, y la densidad de otros vapores se expresa como un número mayor o menor de 1,0 en proporción a su densidad relativa al aire. Gases con un peso específico mayor que 1,0 son más pesados que el aire, mientras que los que tienen un peso específico inferior a 1,0 son más ligeros que el aire.

El hidrógeno gaseoso, con una densidad de $0,0899 \text{ kg/m}^3$, tiene un peso específico de 0,074 y por lo tanto aproximadamente el 7% de la densidad del aire. Para los líquidos, el agua (con una densidad de 1000 kg/m^3) es utilizada como sustancia de referencia, por lo que tiene un peso específico de 1,0 en relación a sí mismo. Al igual que sucede con los gases, los líquidos con un peso específico mayor que 1,0 son más pesados que el agua y los que tienen un peso específico inferior a 1,0 son más ligeros que el agua. El hidrógeno líquido, con una densidad de 71 kg/m^3 , tiene un peso específico de 0,071 y es, pues, aproximadamente también el 7% de la densidad del agua.

2.2.3.- Punto de fusión y ebullición.

El hidrógeno tiene el punto más bajo de ebullición (transición de líquido a gas) y el segundo punto más bajo de fusión (transición de sólido a líquido) de todas las sustancias, sólo superada por el helio.

Las temperaturas de ebullición y de congelación son más significativas en comparación con la temperatura del cero absoluto. El cero absoluto 0 K ($-273 \text{ }^\circ\text{C}$), es la temperatura más baja en el Universo, a la que se detiene el movimiento molecular. El hidrógeno por debajo de su punto de ebullición de 20 K ($-253 \text{ }^\circ\text{C}$) es un líquido y por debajo de su punto de fusión de 14 K ($-259 \text{ }^\circ\text{C}$) es un sólido, a la presión atmosférica. Estas temperaturas son extremadamente bajas. Las temperaturas por debajo de (200 K ; $-73 \text{ }^\circ\text{C}$) son conocidas como temperaturas criogénicas, y los líquidos a estas temperaturas se conocen como líquidos criogénicos.

El punto de ebullición de un combustible es un parámetro crítico, ya que define la temperatura a la que debe enfriarse con el fin de almacenarlo y mantenerlo en estado líquido. Los combustibles líquidos ocupan menos espacio a la hora de almacenarlos que los combustibles gaseosos, y en general son más fáciles de transportar y manipular. Por esta razón, los combustibles que son líquidos a las condiciones atmosféricas, como ocurre con la gasolina, el gasoil, el metanol o el etanol son particularmente convenientes. Por el contrario, los combustibles

como el hidrogeno, que son gases en condiciones atmosféricas son mas complejos de almacenar, ya que deben hacerlo como gas a presión o como líquidos criogénicos.

El punto de ebullición de una sustancia pura aumenta con la presión aplicada hasta cierto punto. Sirva de ejemplo el propano, que con un punto de ebullición de $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede almacenar como un líquido bajo una moderada presión. A temperaturas de 21°C necesitaremos una presión mínima de 7.7 bar para la licuefacción. Sin embargo, el punto de ebullición del hidrógeno sólo puede ser aumentado hasta un máximo de $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ a través de la aplicación de aproximadamente 13 bar, más allá de la cual la presión adicional no tiene un efecto beneficioso. Por esta razón cuando se emplea el hidrógeno como combustible de vehículos, debe ser almacenado como un gas de alta presión o como un líquido criogénico.

2.2.4.- Relación de expansión.

La relación de expansión indica la relación entre el volumen al que un gas o un líquido se almacena en comparación con el volumen del gas o del líquido a presión atmosférica y a temperatura ambiente. La diferencia entre el estado gaseoso y el estado líquido del hidrógeno puede ser fácilmente apreciada si se tiene en cuenta su relación de expansión. Cuando el hidrógeno se almacena en forma líquida, se evapora en la expansión a las condiciones atmosféricas con el correspondiente aumento en el volumen. La relación de expansión de hidrógeno de 1:848 significa que el hidrógeno en estado gaseoso a presión atmosférica ocupa 848 veces más volumen que él que ocupa en su estado líquido.

Cuando el hidrógeno se almacena como un gas a alta presión a 250 bar y a temperatura ambiente, su relación de expansión a presión atmosférica es de 1:240. Mientras que para una mayor presión de almacenamiento aumenta la relación de expansión un poco, el hidrógeno gaseoso bajo cualesquiera condiciones no puede acercarse a la relación de expansión del hidrógeno líquido.

El hidrógeno, incluso como líquido no es muy denso, dándose la paradoja de que un metro cúbico de agua (compuesto de hidrógeno y oxígeno) contiene 111 kg de hidrógeno, mientras que un metro cúbico de hidrógeno líquido contiene solamente 71 kg de hidrógeno. Así, el agua tiene más masa de hidrógeno por unidad de volumen. Esto es debido a la estructura molecular apretada del agua. Esto ocurre también en otros compuestos líquidos que contienen hidrógeno; un metro cúbico de metanol contiene 100 kg de hidrógeno y un metro cúbico de heptano contiene 113 kg. Los hidrocarburos son portadores de hidrógeno de manera compacta y presentan la ventaja añadida de poseer una mayor densidad energética que el hidrógeno puro.

2.3.- PROPIEDADES QUÍMICAS

2.3.1.- Reactividad.

La alta reactividad es una característica de todos los combustibles. En un combustible se produce la reacción química cuando las moléculas del combustible forman enlaces con el oxígeno del aire, de manera que al final, las moléculas que han reaccionado se encuentren en un estado de energía más bajo que el inicial, estado este en el que se encuentran las moléculas que no han reaccionado. Durante el proceso de cambio de estado de la energía química, se produce una cesión de energía que podemos aprovechar para realizar trabajo útil. Esto es cierto tanto en una reacción comburente, como es el caso de un motor de combustión interna donde la energía se libera en forma explosiva como calor o en una reacción electroquímica. Este último tipo de reacción, es el que se produce en una batería o en una pila de combustible en la que la energía se libera como potencial eléctrico y en forma de calor.

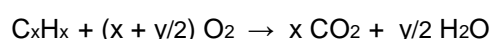
Este tipo de reacciones químicas, a menudo requieren una pequeña cantidad de energía de activación para empezar. Una vez comienzan, la propia energía liberada por la reacción alimenta a esta.

Cuando una pequeña cantidad de energía de activación en forma de chispa se proporciona a una mezcla de hidrógeno y oxígeno, las moléculas reaccionan violentamente, lanzando una cantidad considerable de calor, generando agua como producto final. Esta reacción la experimentamos como un incendio o una explosión, y el agua resultante se evapora y es invisible para nosotros, ya que se trata de un vapor sobrecalentado, el cual se condensa y se hace visible cuando se enfría.

Del mismo modo, debido a que la reacción de formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno es reversible, es posible convertir el agua que se encuentra en un bajo estado de energía, en hidrógeno y oxígeno con un estado de energía más alto, mediante la aportación de una cantidad de energía ligeramente superior a la que se obtuvo anteriormente (el extra para cubrir las pérdidas). Este es el principio que subyace a la producción de hidrógeno mediante electrólisis.

Ventajas del empleo de hidrógeno como combustible.

Cuando se produce una reacción, todos los átomos presentes en el inicio de la misma, están presentes al final de esta pudiendo encontrarse reorganizados en moléculas diferentes. La reacción de combustión donde se aprecia lo anteriormente mencionado es:



Pero esta reacción es teórica, ya que los hidrocarburos combustibles en realidad, además de hidrógeno y carbono, pueden contener otras impurezas como azufre. Además, el aire que encontramos en la atmósfera, aparte del oxígeno, también está compuesto por un 78% de nitrógeno y 1% de gases traza. Tanto la presencia de carbono, nitrógeno y azufre, así como los hidrocarburos que no han reaccionado, forman compuestos químicos que durante la combustión causan el “smog” que provoca consecuencias ambientales y de salud graves:

- El oxígeno reacciona con el carbono para formar monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). El CO, es venenoso para los humanos y limita gravemente en la sangre la capacidad de transporte de oxígeno a los tejidos corporales produciendo mareos, dolores de cabeza, pérdida de la coordinación y la muerte. Esta formación de CO, se ve favorecida por la falta de aire durante la combustión. Cualquier reducción en la formación de CO implica un aumento proporcional de las emisiones de CO₂. El CO₂, es un gas de efecto invernadero y contribuye al calentamiento global, aunque a diferencia del CO es benigno para la salud humana, los seres vivos y además no produce contaminación.
- El oxígeno reacciona con nitrógeno para formar óxidos de nitrógeno (NOx). Estos dañan el tejido pulmonar y actúan como un precursor del ozono, que irrita las vías respiratorias y los ojos. Además disminuyen la capacidad de trabajo de los pulmones, produciendo tos y dolor torácico. En los motores de combustión interna la formación de NOx se ve favorecida por temperaturas de combustión altas (Al aumentar las relaciones de compresión y variar el avance del encendido las emisiones de NOx tienden a aumentar, ya que aumentan la temperatura de combustión.
- El oxígeno reacciona con azufre para formar óxidos de azufre (SOx). El azufre también forma parte del hollín. Las partículas muy pequeñas de hollín (<2,5 micras) no son visibles y pueden alojarse en los pulmones y causar cáncer. Por otro lado, las partículas de hollín grandes, son visibles y se pueden filtrar en el aire, o toser fuera del sistema respiratorio no suponiendo un riesgo tan alto como las de pequeño tamaño.
- Debido a la combustión incompleta y la evaporación las emisiones de hidrocarburos pasan a la atmósfera. Los hidrocarburos sin quemar actúan como precursor de la capa de ozono al igual que las emisiones de NOx. Estos hidrocarburos son compuestos orgánicos volátiles (VOC's, “volatile organic compounds”) o hidrocarburos reactivos (RHC). Los RHC, tales como la gasolina que producen “smog” fotoquímico (polución visual), a diferencia de estos, los VOC's, como el gas natural, no producen “smog”.

La cantidad de contaminación y la forma en que se manifieste va a estar ligada al tipo de combustible empleado y al uso de convertidores post-combustión catalítica. Los hidrocarburos

ligeros son relativamente ricos en hidrógeno y por lo tanto ofrecen menos átomos de carbono para la formación de CO y CO₂. Además, los combustibles que contienen azufre, producen SO_x.

El hidrógeno es un combustible casi ideal en términos de reducción de la contaminación en su combustión, ya que no contiene carbono ni azufre, por lo que su combustión se presenta sin emisiones de CO, CO₂ y SO_x. El hidrógeno permite mezclas más pobres de combustión, resultando temperaturas de combustión menores y por tanto emisiones de NO_x más bajas. El hidrógeno es un combustible ideal en términos de reducción de la contaminación cuando se utiliza por vía electroquímica en una celda de combustible, en lugar de por combustión. El hidrógeno en una celda de combustible produce cero emisiones nocivas. Los óxidos de nitrógeno se eliminan por completo debido a la baja temperatura de funcionamiento (80 °C) de las celdas. Además, empleando una celda de combustible evitamos la contaminación de los aceites lubricantes al no estar presentes ya que no son necesarios.

2.3.2.- Contenido energético y Densidad de energía.

Contenido energético.

El contenido energético que puede liberar un combustible, cuando se reacciona completamente para formar agua, se mide experimentalmente y se cuantifica mediante el poder calorífico, definiéndose el poder calorífico de un combustible como la entalpía de su reacción de combustión completa.

El poder calorífico superior (PCS) se obtiene cuando todo el agua formada en la combustión es vapor, es decir cuando el agua resultante de la combustión se supone en estado de vapor con los demás productos de la combustión. El poder calorífico inferior (PCI) se obtiene cuando toda el agua formada en la combustión se encuentra en fase líquida. La diferencia entre el PCS y el PCI es la energía utilizada para convertir el agua líquida en vapor. En la tabla 2.1, se pueden ver los valores de los poderes caloríficos superior e inferior de varios combustibles.

Combustible	PCS (kcal/kg) / (MJ/kg) (a 25 °C y 1 atm.)	PCI (kcal/kg) / (MJ/kg) (a 25 °C y 1 atm.)
Hidrógeno	34.046 / 141.86	28.783 / 119.93
Metano	13.327 / 55.53	12.000 / 50.02
Propano	12.086 / 50.36	10.944 / 45.6
Gasolina	11.400 / 47.5	10.680 / 44.5
Diesel	10.752 / 44.8	10.200 / 42.5
Metanol	4.790 / 19.96	4.332 / 18.05

Tabla 2.1- Comparativa de poderes caloríficos de distintos combustibles a 25°C y 1 atm.

Aunque los términos PCS y PCI no se aplican a las baterías, la energía específica, entendiendo por esta la energía por unidad de masa de una batería de plomo-ácido, es de aproximadamente 0.108 MJ/kg. Como se puede apreciar la diferencia es muy importante.

El agua que resulta de una reacción, ya sea comburente o electroquímica dentro de una celda de combustible se produce en forma de vapor, por lo que el poder calorífico inferior representa la cantidad de energía disponible para realizar el trabajo externo. Los combustibles gaseosos que se encuentran vaporizados, no requieren de energía para convertirlos en un gas.

Como se puede ver en la tabla 1, los poderes caloríficos superior e inferior indican la cantidad de energía para un determinado peso de combustible. El hidrógeno tiene la proporción más alta de energía-peso de cualquier combustible, dado que el hidrógeno es el elemento más ligero y no tiene átomos de carbono pesados. Es por esta razón por la que el hidrógeno se ha utilizado ampliamente en los programas espaciales donde el peso es fundamental. En concreto, la cantidad de energía liberada durante la reacción de hidrógeno, con la misma masa, es aproximadamente 2,5 veces el calor de la combustión de hidrocarburos comunes (gasolina, gasoil, metano, propano, etc.) Por lo tanto, para una carga dada, la masa de hidrógeno que se requiere es sólo un tercio de la masa necesaria de hidrocarburos. El alto contenido de energía de hidrógeno también implica que la energía de una explosión de gas de hidrógeno es aproximadamente 2,5 veces la de los hidrocarburos comunes. Así, sobre una misma masa, las explosiones de gas de hidrógeno son más destructivas y llegan más lejos. Sin embargo, la duración de una explosión tiende a ser inversamente proporcional a la energía de combustión, por lo que los incendios de hidrógeno desaparecen o amainan mucho más rápidamente que los incendios de hidrocarburos.

Densidad de energía.

La densidad de energía representa la cantidad de energía para un *volumen* determinado de combustible, mientras que el contenido de energía como ya hemos visto, nos indica la cantidad de energía para una determinada masa. Por lo tanto, la densidad de energía de un determinado combustible es el producto del contenido energético (elegimos el PCI, ya que es el que se suele tomar como referencia en los contratos de compra de gas) por la densidad del combustible.

Observando la Tabla 2.2 se puede ver que la densidad de energía del hidrógeno es pobre, ya que tiene baja densidad, aunque su contenido energético es el mejor de todos los combustibles.

Combustible	Densidad de energía en MJ/m ³
Hidrógeno	10.10 (gas a 1 atm y 15° C)
	1833.82 (gas a 200 bar y 15°C)
	4521.74 (gas a 690 bar y 15°C)
	8531.86 (líquido)
Metano	32.71 (gas a 1 atm y 15° C)
	6893.45 (gas a 200 bar y 15°C)
	21021.50 (líquido)
Propano	87.08 (gas a 1 atm y 15° C)
	23600.99 (líquido)
Gasolina	31300.52 (líquido)
Diesel	31585.22 (líquido)
Metanol	15876.35 (líquido)

Tabla 2.2.- Densidad de Energía de varios combustibles.

Según almacenemos un combustible en forma líquida o gaseosa, su densidad de energía se va a ver afectada. Además, si es en forma de gas, también va a estar influenciada por la presión a la que se encuentre. Sirva como aclaración el siguiente ejemplo.

Un volumen de hidrógeno líquido de 2.100 litros es equivalente energéticamente a un volumen de hidrógeno gas de 8000 litros almacenado a una presión de 250 bar y es a su vez equivalente a un tanque de gasoil de 500 litros de volumen con un peso de 400 kg. De lo anterior se deduce, que el volumen almacenado como gas supone un aumento de 16 veces en volumen respecto al tanque de gasoil, aunque su peso es tan solo de 150 kg. Y en caso de almacenarlo como líquido, el volumen de hidrógeno, respecto al del tanque de gasoil, aumenta en una proporción de 4,2 veces.

Por el contrario, si almacenamos el hidrógeno como un hidruro metálico, cada kilogramo de combustible diesel se sustituirá por unos 4,5 kg de hidruro para mantener la misma equivalencia energética entre el gasoil y el hidrógeno. Según esto, el tanque de 500 litros de gasoil debería ser sustituido por un tanque que contuviera 1.725 kg de hidruro en masa.

2.3.3.- Inflamabilidad.

Para que se produzca un incendio o una explosión, necesitamos un combustible, un comburente (oxígeno) y una fuente de ignición (chispa, llama, etc.). La combinación de estos tres elementos, es lo que se conoce como el Triángulo del Fuego.

Punto de inflamación o "Flashpoint"

Es la temperatura mínima, a presión normal (1 atm = 760 mm Hg), a la que un material desprende cantidad suficiente de vapor para mezclarse con el oxígeno y formar una mezcla inflamable.

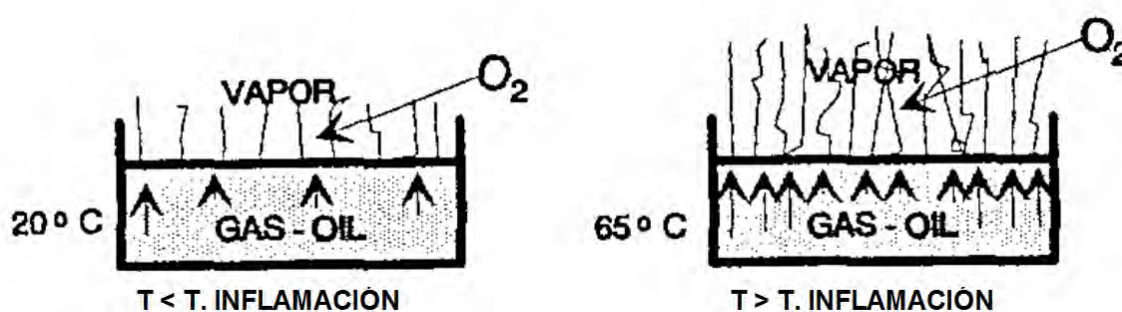


Figura 2.1.- Rangos de temperatura de inflamación del Gas-oil.

Todos los combustibles "queman" sólo en estado gaseoso o vapor. Combustibles como el hidrógeno o el metano son gases ya en condiciones atmosféricas, mientras que otros combustibles como la gasolina o el gasoil que son líquidos deben convertirse a vapor antes de que se quemen. Es importante reseñar, en el caso de los Combustibles líquidos, que la temperatura de inflamación aumenta al hacerlo la presión ambiente. El punto de inflamación es siempre inferior al punto de ebullición. En la tabla 2.3, se muestra el punto de inflamación de diferentes combustibles.

Combustible	Punto de Inflamación
HIDRÓGENO	-253°C
METANO	-188°C
PROPANO	-104°C
GASOLINA	-43°C
METANOL	11°C

Tabla 2.3.- Comparativa del Punto de Inflamación de distintos Combustibles

Límites de inflamabilidad.

Los *Límites de inflamabilidad*, son los Límites Máximo y Mínimo de concentración necesaria de vapores procedentes de un material combustible, con respecto al oxígeno, para que la combustión se inicie y mantenga.

Si la mezcla de vapor/oxígeno es baja estaremos en la zona de “L.I.I.” Límite Inferior de Inflamabilidad (L.F.L.: Lower Flammability Limit) y no se producirá la combustión por encontrarse la mezcla muy pobre de vapores de combustible, respecto al oxígeno. Igualmente, no existirá posibilidad de que se inicie la combustión cuando la mezcla vapor/oxígeno es alta en la zona de “L.S.I.” Límite Superior de Inflamabilidad (U.F.L.: Upper Flammability Limit), en donde la concentración de vapores de combustible es muy alta respecto a la cantidad de oxígeno. Al aumentar la temperatura de la mezcla se ensancha el margen de inflamabilidad e igualmente al disminuir la temperatura, el margen se estrecha. Esto se puede apreciar en la figura 2.2.

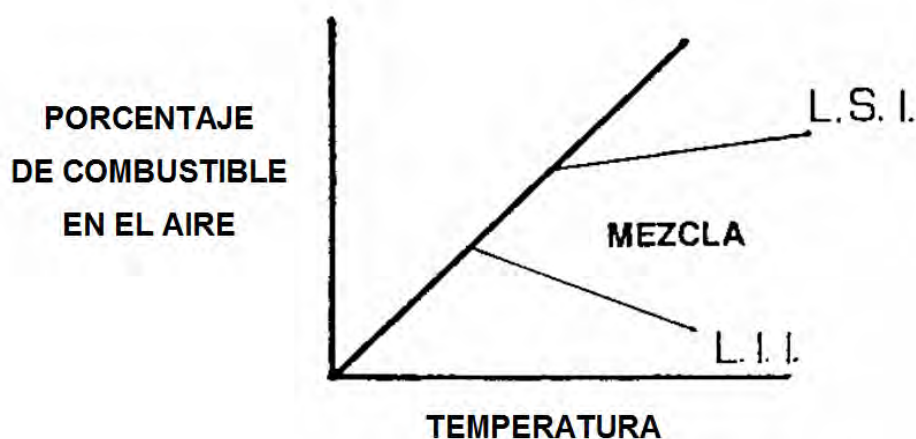


Figura 2.2. Variación de los Límites de inflamabilidad con la temperatura.

Los Límites de Inflamabilidad, de cualquier combustible, están determinados por las composiciones químicas y características físicas, por lo que cada material tiene sus Límites propios. En la tabla 2.4, se puede ver un ejemplo del límite de inflamabilidad de diferentes materiales.

PRODUCTO	% DE VOLUMEN EN AIRE	
	L.I.I. (L.F.L.)	L.S.I (U.F.L)
ALCOHOL	4.3	19.0
GASOLINA	1.4	7.6
KEROSENO	0.7	5.0
PROPANO	2.2	9.5
BUTANO	1.9	8.5
HIDRÓGENO	4.0	75.0
ACETILENO	2.5	81.0

Tabla 2.4. Límites de inflamabilidad.

Los motores de combustión interna y los sistemas con pilas de combustible funcionan normalmente con mezclas pobres ya que esta situación promueve la reacción completa de todo el combustible disponible.

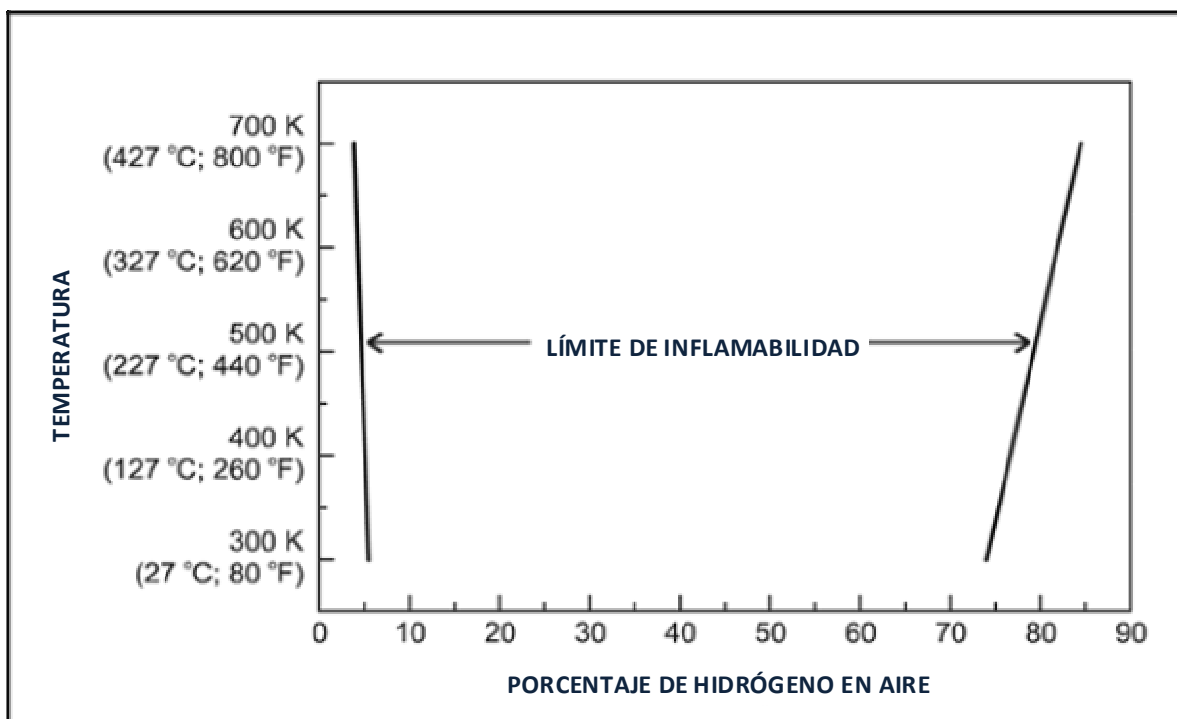


Figura 2.3.- Límites de Inflamabilidad para el hidrógeno.

Dos conceptos relacionados son el límite inferior de explosividad (L.E.L., Lower Explosive Limit) y el límite superior de explosividad (U.E.L., Upper Explosive Limit). Estos términos a menudo se intercambian con el L.F.L. y U.F.L., a pesar de que no son lo mismo. El L.E.L. es la concentración de gas más baja que proporciona una explosión cuando se mezcla con aire y se enciende. Del mismo modo, la U.E.L. es la mayor concentración de gas que soportará una explosión cuando se mezcla con el aire y se enciende.

El hidrógeno es inflamable en un amplio rango de concentraciones en el aire (4% a 75%) y es explosivo también en un amplio rango de concentraciones (15% a 59%), en condiciones estándar. En la figura 2.3, se muestran los Límites de inflamabilidad para el hidrógeno y como afecta la temperatura a estos. Como resultado, incluso pequeñas fugas de hidrógeno tienen el potencial de provocar quemaduras o explotar.

Temperatura de auto ignición.

La temperatura de auto ignición es la temperatura mínima necesaria para iniciar la combustión sostenida en una mezcla de combustible inflamable y aire en ausencia de una fuente de ignición. En otras palabras, el combustible se calienta hasta que se produce llama. Cada

combustible tiene una temperatura de ignición única. Para el hidrógeno, la temperatura de auto ignición es relativamente alta, 1085 °F (585 °C). Esto hace que sea difícil de encender una mezcla de hidrógeno/aire sobre una base de calor, sin una fuente de ignición adicional. Las temperaturas de ignición espontánea de varios combustibles se indican en la tabla 2.5.

Combustible	Punto de Inflamación
HIDRÓGENO	585°C
METANO	540°C
PROPANO	490°C
GASOLINA	230 a 480 °C
METANOL	385°C

Tabla 2.5.- Temperaturas de auto ignición.

Energía de ignición.

La energía de ignición es la cantidad de energía externa que debe ser emitida con el fin de encender una mezcla de combustible inflamable. La energía de una fuente externa debe ser superior a la que tendría el combustible a la temperatura de auto ignición y tener una duración suficiente para calentar el vapor de combustible a su temperatura de ignición. Las fuentes de ignición más comunes son llamas y chispas.

El hidrógeno tiene una energía de ignición más baja que el metano (0.29 mJ) o la gasolina (0.24 mJ), su energía de ignición es 0,017 mJ cuando se encuentra a una presión de. 101.3 kPa y por lo tanto más fácilmente inflamable. Incluso una descarga de electricidad estática de un cuerpo humano (en condiciones en seco) pueden tener la energía suficiente para provocar la ignición. No obstante, es importante darse cuenta de que la energía de ignición es muy baja para todos estos combustibles por lo que las condiciones de que provoquen el encendido de un combustible, en general también encenderán al resto.

El hidrógeno tiene una baja conductividad eléctrica, por lo que el flujo o la agitación del gas, o líquido, de hidrógeno pueden generar cargas electrostáticas que den lugar a chispas. Las llamas de hidrógeno son de un azul muy pálido y son casi invisibles a la luz del día debido a la ausencia de hollín, siendo más visibles con luz tenue o en la oscuridad. La visibilidad también es mayor por la presencia de humedad o de impurezas (como el azufre) en el aire. No obstante, en muchos casos, las llamas de un incendio de hidrógeno pueden encender los materiales cercanos que sí pueden producir humo y hollín durante la combustión.

El hidrógeno como gas aumenta su volumen rápidamente debido a su alta flotabilidad y difusividad. Como consecuencia de esto, los incendios que se producen con hidrógeno, se manifiestan verticales y muy localizados. Si una embarcación contiene botellas de hidrógeno y

éstas sufren una ruptura, se encienden y el fuego quema la embarcación, pero en el interior del guardacalor, donde van estibadas, no suele hacer mucho calor. Por el contrario, la gasolina forma una piscina, que se extiende lateralmente, y sus vapores forman una nube persistente, por lo que los incendios de gasolina son amplios y abarcan un área extensa. Cuando un tanque de gasolina de una embarcación sufre una ruptura y se enciende, el fuego devora la embarcación en cuestión de segundos y hace que la temperatura en toda la embarcación aumente dramáticamente. Por tanto podemos concluir afirmando, que el hidrógeno quema con mayor vigor que la gasolina, pero en un periodo más corto de tiempo.

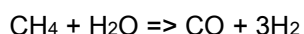
2.4.- METODOS PARA LA OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO.

Existen diferentes métodos para la obtención del hidrógeno. A continuación se explica en que consiste cada uno de ellos.

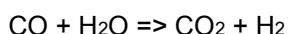
2.4.1.- Reformado con vapor.

La mayoría del hidrógeno empleado por la industria petroquímica se genera mediante el reformado por vapor ("Steam reforming"). El proceso tiene una eficiencia entre el 70 y el 90%. En este procedimiento el hidrógeno se obtiene a partir de hidrocarburos, fundamentalmente procedentes del gas natural. El principal componente del gas natural es metano CH₄ y la reacción consiste básicamente en separar el carbono del hidrógeno. El proceso tiene lugar en dos etapas:

- En la primera etapa o fase inicial, el gas natural se convierte en hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono.



- La segunda etapa consiste en producir hidrógeno adicional y dióxido de carbono a partir del monóxido de carbono producido durante la primera etapa: el monóxido de carbono es tratado con una corriente de vapor a alta temperatura produciéndose hidrógeno y dióxido de carbono. El hidrógeno producido, se almacena en tanques.



2.4.2.- Oxidación parcial de combustibles fósiles con defecto de O₂.

En este proceso, se obtiene una mezcla de hidrógeno que posteriormente se purifica. Las cantidades de oxígeno y vapor de agua son controladas para que la gasificación continúe sin necesidad de aporte de energía.

2.4.3.- Electrólisis de agua.

Este proceso produce un hidrógeno de gran pureza, pero es mucho más caro que el reformado con vapor. Este hidrógeno se utiliza en la industria electrónica, farmacéutica o de la alimentación.

El hidrógeno, se obtiene haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua, lo que produce una disociación entre el hidrógeno y el oxígeno, componentes de la molécula del agua H₂O, según la siguiente reacción:



Como se necesita aportar energía eléctrica mediante una fuente de corriente continua, la reacción se lleva cabo en una celda electrolítica. El hidrógeno (en estado gaseoso) se recoge en el cátodo (polo cargado negativamente) y el oxígeno (también en estado gaseoso) en el ánodo.

2.4.4.- Termólisis de agua.

La termólisis es una reacción química en la que un compuesto se separa en al menos otros dos cuando se somete a un aumento de temperatura. Se trata de una reacción endotérmica porque requiere un aporte de calor para romper los enlaces químicos. La temperatura necesaria para que este proceso tenga lugar es la temperatura de descomposición. De este modo el agua calentada a más de 2500 °C rompe sus enlaces y se convierte en átomos de hidrógeno y oxígeno.

2.4.5.- Gasificación de biomasa.

Se somete a la biomasa a un proceso de combustión incompleta entre 700 °C y 1200 °C. El producto resultante es un gas combustible compuesto fundamentalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono.

2.4.6.- Pirólisis de biomasa.

En este proceso, como en el de la Gasificación de la Biomasa, también se realiza una combustión incompleta de la biomasa, pero en este caso en ausencia de oxígeno y a una temperatura inferior de unos 500 °C. Obteniéndose carbón vegetal y gas mezcla de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos ligeros.

2.5.- SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO.

Como vimos anteriormente, el hidrógeno tiene una baja densidad energética en base volumétrica, debido a esto para igualar la autonomía con respecto a otros combustibles como puede ser la gasolina, necesitamos tanques de un tamaño muy superior. Aunque existen diversas tecnologías para el almacenamiento del hidrógeno, ninguna satisface completamente todos los requerimientos exigidos. A continuación, vamos a estudiar las diferentes tecnologías existentes para el almacenamiento del hidrógeno.

2.5.1.- Hidrógeno en fase gaseosa comprimido a alta presión.

El hidrógeno es almacenado a altas presiones en tanques, normalmente cilíndricos, compuestos por materiales de alta resistencia para asegurar su durabilidad. Es una de las tecnologías más comunes y sencillas. El diseño de estos tanques no está totalmente optimizado ya que tienen un gran volumen y presentan todavía problemas de seguridad, al trabajar a tan elevadas presiones. Los requerimientos del tanque, desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas, deben ser muy estrictos. Los prototipos actuales se construyen con un revestimiento interior realizado de un polímetro como una malla de polietileno o poliamida cubierta con una fibra de grafito y una capa de refuerzo epoxy. A la hora de fabricar estos tanques, se debe tener en cuenta que el hidrógeno tiene una cierta tasa de permeabilidad a través de estos revestimientos poliméricos. Si se produce esta penetración, se generará una pérdida gradual de la presión de hidrógeno, que al salir puede dañar y debilitar la capa de refuerzo del tanque. Para evitar esto, se debe crear una barrera de difusión de hidrógeno aplicada al revestimiento interior polimérico. Esta barrera debe tener baja permeabilidad al hidrógeno, buena adhesión al revestimiento polimérico, una rigidez de capa igual a la del polímetro para evitar la rotura en el momento de presurizar el tanque. En las figuras 2.4 y 2.5, se muestra respectivamente, un tanque de hidrógeno comprimido y los materiales de que se compone.

Para almacenar de 6 Kg de hidrógeno comprimido a 35 MPa se necesita un volumen de 255 litros (sin incluir el tanque de almacenamiento ni dispositivos adicionales), ya que su densidad es de 23.5 g/l. Si aumentamos la presión hasta los 69 MPa, la densidad del hidrógeno es de 38.7 g/l, lo cual implica la necesidad de un recipiente menor de 155 litros. Por otra parte, comprimir el hidrógeno a 35 MPa supone en torno al 8% de la energía contenida en el hidrógeno comprimido.



Figura 2.4.- Tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido.

Los tiempos de recarga no es un problema en este tipo de dispositivos, solamente se debe controlar y regular para evitar un posible aumento de temperatura debido a un llenado demasiado rápido.

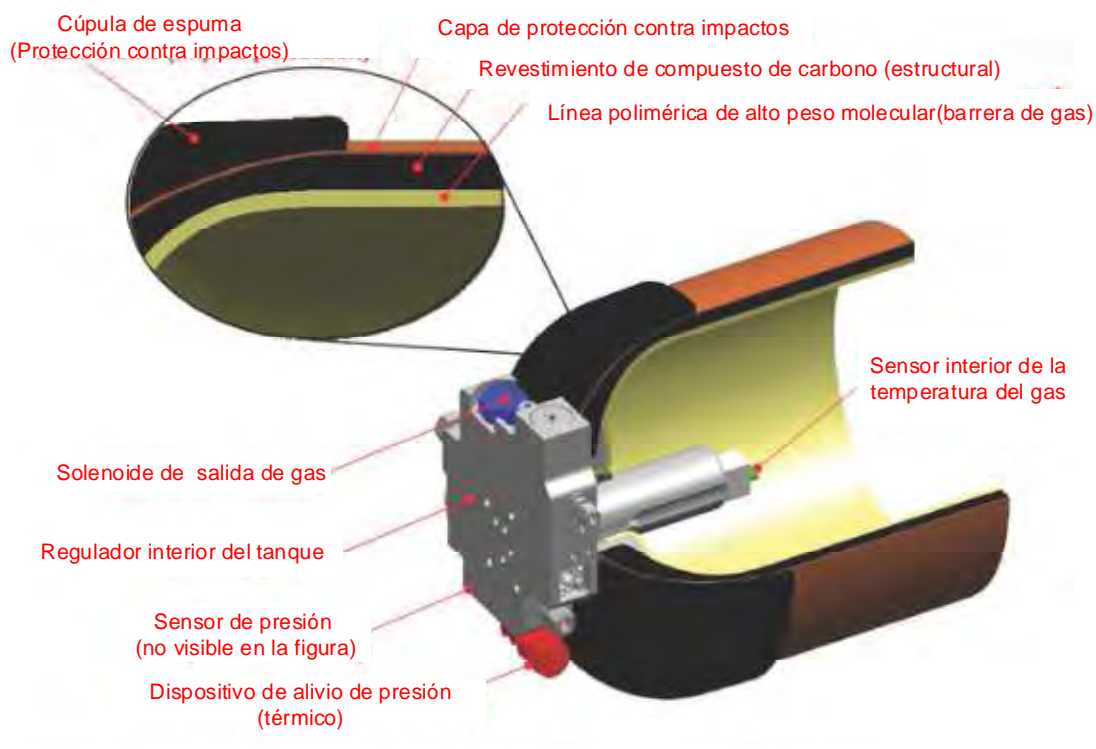


Figura 2.5.- Sección de un tanque de almacenamiento de hidrógeno comprimido.

2.5.2.- Hidrógeno en fase líquida o criogénico.

El hidrógeno líquido o criogénico, se obtiene a partir de la licuefacción del mismo. El proceso de licuefacción utiliza para conseguir el enfriamiento, una combinación de compresores, válvulas de expansión e intercambiadores de calor. Para conseguir la licuefacción, el proceso más sencillo es emplear el Ciclo de Linde o Ciclo de expansión de Joule Thompson. En esta última parte del proceso, parte del gas es licuado y el gas restante se recircula por el intercambiador de calor y vuelve al compresor, comenzando de nuevo el ciclo.

En el ciclo de Linde, el gas sufre en un primer momento una compresión isotérmica a temperatura ambiente, posteriormente se realiza un enfriamiento a presión constante en un intercambiador de calor y para finalizar una expansión isentálpica.

El hidrógeno se calienta al expandirse a temperatura ambiente y el ciclo de Linde funciona con gases que se enfrían al expandirse a temperatura ambiente por tanto, debemos enfriar el hidrógeno gaseoso en la expansión a una temperatura de 202 K (-95°C) que es su temperatura de inversión. Para conseguir esto, se emplea nitrógeno líquido con lo que preenfriamos el hidrógeno gaseoso hasta una temperatura por debajo de 78 K (-319°C) antes de

la primera expansión de la válvula. En la figura 2.6, se puede ver un Diagrama de flujo de una licuefacción con preenfriamiento.

Otro sistema que se puede emplear como sustituto al proceso de preenfriamiento de Linde, consiste en el empleo de una turbina, por la que hacemos pasar el gas a alta presión. De esta manera conseguimos el enfriamiento del mismo, ya que al hacer pasar un gas a través de una turbina, se va a producir el enfriamiento de este, sea cual sea su temperatura de inversión.

La principal ventaja de esta técnica con respecto a la anterior, es que el hidrógeno en su forma líquida presenta mayor densidad energética que en forma gaseosa y esto hace que sea una técnica de almacenamiento con gran potencial.

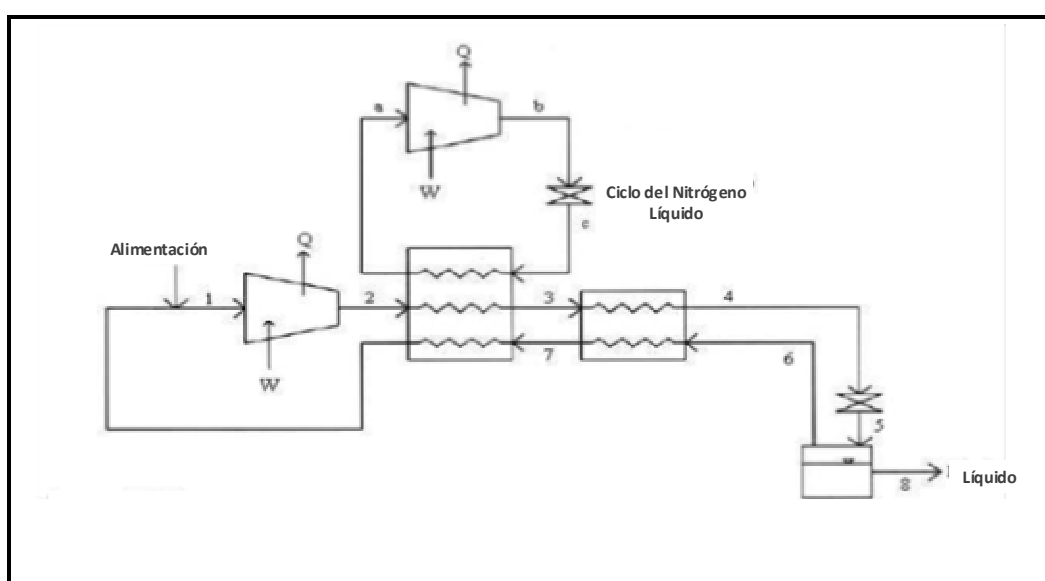


Figura 2.6.- Diagrama de flujo de una licuefacción con preenfriamiento.

Otra ventaja del almacenamiento criogénico, en comparación con el almacenamiento de gas comprimido es la presión de trabajo, ya que esta es relativamente baja, y los volúmenes requeridos para almacenar la misma cantidad de hidrógeno son mucho menores. Sirva como ejemplo, si queremos almacenar 6 kg de hidrógeno líquido, nos ocuparán tan solo 85 litros, no teniendo en cuenta ni el contenedor, ni el equipo auxiliar de recarga y control de llenado del tanque. Esto es así gracias a la densidad del hidrógeno en estado líquido cuyo valor es 70.8 g/l. No obstante, presenta ciertas desventajas, como son:

- La energía necesaria para licuar el hidrógeno es aproximadamente un tercio de la energía que se libera en la reacción del hidrógeno y el oxígeno (120 MJ/kg H_2), lo cual muestra que la eficacia energética del proceso global disminuye notablemente. El proceso de licuar el H_2 puede consumir entre el 33-40% de la energía que contiene el hidrógeno

líquido. Además, es necesario un estricto control de la estabilidad térmica para evitar todo riesgo de sobrepresión.

- El hidrógeno criogénico, presenta una gran limitación debido a la baja eficiencia de almacenamiento y a las pérdidas/fugas asociadas. El almacenamiento se debe realizar en tanques que se encuentren en condiciones criogénicas, de lo contrario se producen fugas de hidrógeno por evaporación. Al cabo de cierto tiempo es inevitable que el hidrógeno se caliente y pase de estado líquido a gaseoso, aumentando la presión en el interior del tanque y produciéndose la fuga de hidrógeno a través de la válvula de venteo. Al tiempo que transcurre desde la carga hasta la primera pérdida de hidrógeno a través del venteo se le denomina “tiempo latente”. Conseguir un tanque con un gran aislamiento térmico y una elevada estanqueidad, para que las pérdidas de hidrógeno sean mínimas es crítico. En este tipo de sistemas siempre existen pérdidas inevitables de hidrógeno, y esto hace que sea recomendable que el consumo del hidrógeno del tanque se realice en un intervalo razonable de tiempo (del orden de una semana). General Motors estimó unas pérdidas del 4% por día, lo que daría una duración de unos 25 días para un depósito que almacene 4.6 kg de hidrógeno en estado líquido.

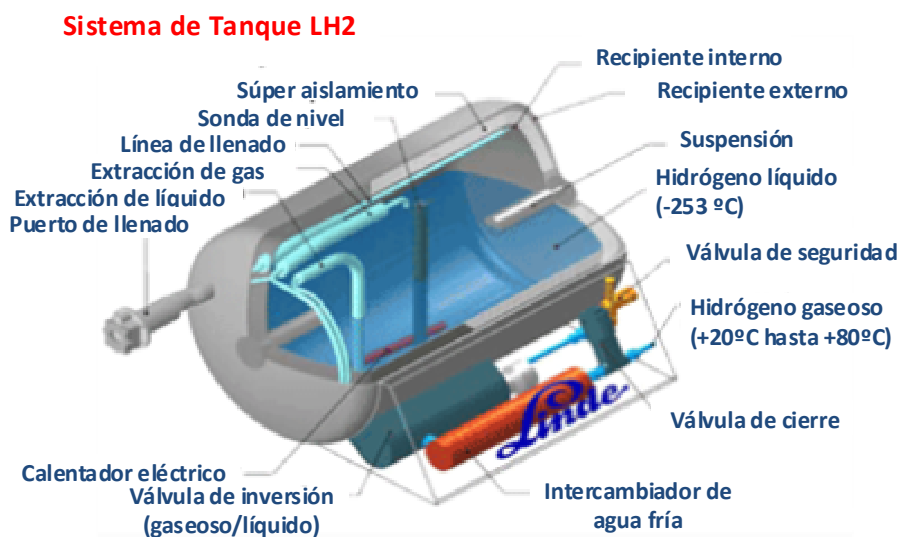


Figura 2.7.- Esquema de un tanque de hidrógeno líquido.

La recarga de los tanques criogénicos es una operación más compleja que la que se realiza en los tanques de aire comprimido, ya que se necesita que las líneas estén termostalizadas, por lo tanto necesitaremos sistemas de refrigeración y compresores. Debido a esto, se produce un aumento de la complejidad del proceso global.

Fabricantes del sector de la automoción, como es el caso de BMW, han trabajado junto con otras marcas en el desarrollo de un depósito de hidrógeno líquido, que a diferencia de los tradicionales, no está fabricado en acero, sino con un material compuesto que reduce el peso hasta tres veces menos, además de incluir todos los sistemas asociados al depósito, dentro del mismo.

2.5.3.- Hidruros metálicos.

Los hidruros metálicos se forman por reacción química entre un metal y el hidrógeno. El hidrógeno actúa con valencia uno y el metal con cualquiera de sus valencias. Los metales de transición, los lantánidos y los actínidos en general no forman compuestos con el hidrógeno. En esta reacción química se forma un compuesto sólido y se desprende calor (reacción exotérmica).

En la reacción inversa, el hidrógeno se libera cuando se aplica cierta energía al compuesto formado. Inicialmente, la molécula de hidrógeno se absorbe sobre la superficie del metal y posteriormente ésta se disocia formando dos átomos de hidrógeno individuales. Los dos aspectos críticos que hay que optimizar en este tipo de aplicación son el peso del sistema y la temperatura a la cual se libera el hidrógeno.

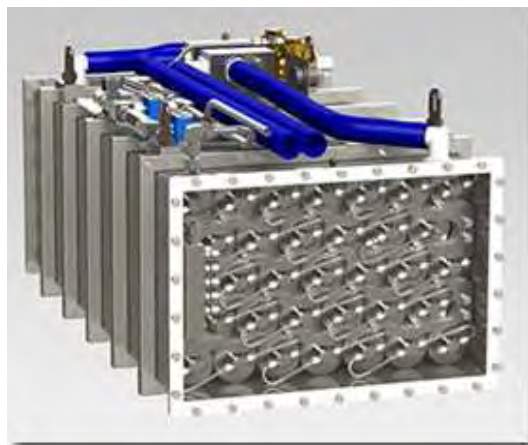


Figura 2.8.- Unidad de almacenamiento de hidruro metálico reversible, con capacidad de almacenamiento de 3.5 kg de hidrógeno.

Cuando se necesita utilizar el hidrógeno almacenado, es necesario que éste se libere del compuesto formado en unas condiciones de temperatura y de presión que no sean extremas. Además, este proceso, tiene que poder repetirse muchas veces sin que el metal pierda su capacidad de almacenamiento con el uso.

Esta técnica de almacenamiento es necesario optimizarla y para conseguirlo se deben entender mejor los mecanismos y la termodinámica de los procesos que están involucrados en la formación del hidruro metálico. Existen diferentes tipos de hidruros metálicos:

- *Hidruros metálicos intersticiales:* Suelen presentar una capacidad de almacenamiento del 1,8% en masa cuando se encuentran a una temperatura entre los 333 K y los 343 K y algunos, como en el caso de los compuestos quasi-cristalinos del tipo Zr-Ti-Ni, pueden alcanzar capacidades de más del 3% en masa . El inconveniente, es que presentan problemas de reversibilidad de hidrógeno.

- *Polvo de magnesio*: El magnesio en forma pulverizada es extremadamente inflamable y en contacto con el aire y a partir de temperaturas no muy elevadas, reacciona rápidamente produciendo hidrógeno. Alcanza capacidades de hasta un 5-6% en masa cuando se encuentran a una temperatura entre los 533 K y los 553 K (0,99 atm). El inconveniente de estos, es que se hace necesario mejorar sus cinéticas, utilizando procedimientos de bajo coste.
- *Complejos de hidruros de metales ligeros (alanatos y compuestos isoestructurales)*: Absorben de un 5 a un 8% en masa de hidrógeno, pero liberan pequeñas cantidades de hidrógeno. Los complejos de hidruros catalizados por Ti ó Zr son considerados los más prometedores dentro de esta categoría. A escala de laboratorio, los alanatos son buenos candidatos para el diseño de tanques de almacenamiento de hidrógeno, pero es necesario optimizar sus cinéticas de absorción/liberación.

Este tipo de almacenamiento mediante tanques de hidruros, presenta la ventaja de una alta capacidad por unidad de volumen, además de operar a presiones normales, lo que evita que se produzcan perdidas, pero tiene el inconveniente de ser demasiado pesado para las aplicaciones móviles, así como un alto coste, debido a los materiales empleados.

En la actualidad, se están buscando hidruros que almacenen grandes cantidades de hidrógeno, pero que a la vez, posean cinéticas rápidas y que liberen el hidrógeno almacenado en condiciones de temperatura y presión moderadas. El almacenamiento de H₂ en hidruros metálicos intersticiales ha sido demostrado por Texaco Ovonic. La unidad almacenaba 3 kg de hidrógeno y pesaba 190 kg, ocupando un volumen de 70 litros. Los test de laboratorio indicaron un tiempo de llenado del tanque de 10 minutos y que el suministro permitiría un recorrido de 240 km.

2.5.4.- Materiales Porosos.

Este tipo de almacenamiento del hidrógeno empleando materiales porosos, presenta una gran ventaja en comparación con los métodos anteriores, ya que permite una mayor capacidad volumétrica de almacenamiento de hidrógeno, además de realizarlo de forma segura. Sin embargo, esta tecnología todavía está en desarrollo. Los materiales que se pueden incluir en esta categoría son:

- Materiales de carbono, como pueden ser nanotubos (figura 2.9), nanofibras, carbones activados, fibras activadas, polímeros orgánicos, carbones dopados, etc.
- Zeolitas (figura 2.10), silicatos, polímeros inorgánicos, etc.

Los materiales carbonosos presentan un bajo peso y unas excelentes cinéticas basadas en ligeras fuerzas de Van der Waals entre el hidrógeno y la superficie de los materiales. Este tipo de materiales son interesantes en el ámbito del almacenamiento del hidrógeno, ya que este puede ser adsorbido reversiblemente mediante un proceso de fisisorción sobre la superficie de los materiales carbonosos. Materiales con una gran área específica como los carbonatos nanoestructurados y los nanotubos de carbono son substratos adecuados para la fisisorción.

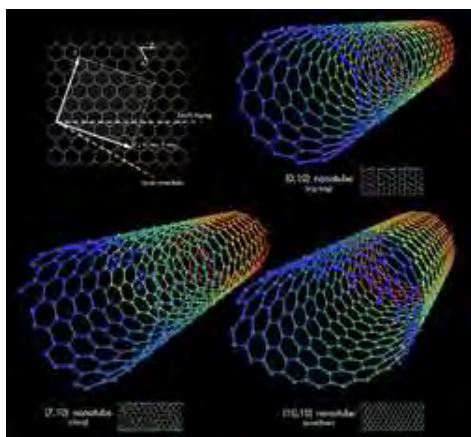


Figura 2.9.- Nanotubos de carbono.



Figura 2.10.- Zeolitas.

Los resultados obtenidos en los trabajos publicados por la Universidad Noroeste, MA, USA basados en nanoestructuras de carbono, realizados en el año 1998, mostraban almacenamientos excepcionales de hasta el 60% en masa. Estos sorprendentes resultados no han podido reproducirse hoy en día, lo que sugiere la existencia de errores experimentales en su determinación, ya que no son reproducibles. Sin embargo, a raíz de este hallazgo y hasta el momento, se está dedicando un gran esfuerzo al estudio de nanoestructuras de carbono con elevada superficie específica (fibras, nanotubos y carbones activados), concluyendo que la cantidad de hidrógeno adsorbida es proporcional a la superficie específica del material de carbono.

También se ha podido determinar tras varios estudios, que los materiales carbonosos, deben poseer además de una gran superficie específica un gran volumen de microporos con un tamaño determinado ($\leq 0,7$ nm). En el caso de realizar la adsorción de hidrógeno a temperatura ambiente, los materiales carbonosos con una distribución de microporos estrecha son los más adecuados para esta aplicación. Por ello, es de especial importancia el diseño de nuevos materiales de carbono que permitan el ajuste y control de sus propiedades texturales finales. Según va disminuyendo la presión y aumentando la temperatura, se produce una disminución de la cantidad de hidrógeno absorbido.

A día de hoy, no existe un material carbonoso totalmente eficaz, el reto es aumentar las débiles interacciones presentes en el proceso de fisisorción o adsorción física (en química se denomina adsorción al acúmulo o depósito de material en un plano o superficie) entre la superficie

carbonosa y la molécula de hidrógeno, a temperaturas superiores a su temperatura crítica (33 K). Además, existe un conflicto entre obtener grandes volúmenes de poros para aumentar la adsorción de hidrógeno y la disminución en la energía de interacción entre el adsorbato/adsorbente en poros más anchos. Es decir, es difícil conseguir adsorbentes con un gran volumen de microporos estrechos y una distribución de tamaños de poro estrecha. Por ello es de especial importancia desarrollar vías de obtención de nuevos materiales carbonosos que permitan controlar y ajustar la porosidad del material final.

El objetivo es almacenar el material poroso en un tanque que trabaje a presiones moderadas y temperaturas criogénicas. Para obtener una buena capacidad de almacenamiento de H₂ en materiales carbonosos porosos, se deben combinar altas áreas superficiales, con volúmenes de poros adecuados y una buena densidad de empaquetamiento. Teniendo estos factores en cuenta, los valores de capacidad gravimétrica y volumétrica comparan bastante bien con los datos de hidrógeno comprimido, aunque sería una opción desfavorable frente al H₂ licuado.

La tecnología de almacenamiento en sólidos carbonosos porosos presenta una mayor eficiencia energética que el resto de las tecnologías disponibles. En el almacenamiento de H₂ en materiales carbonosos porosos los calores de desorción son bastante bajos (2.5 kJ/g H₂) si se comparan con los hidruros metálicos (10-20 kJ/g H₂), por lo que este sistema de almacenamiento es más eficiente (menor gasto energético asociado). Si lo comparamos con otros sistemas de almacenamiento, se obtiene que la energía necesaria para comprimir H₂ a 34-69 MPa es 9-12 kJ/g H₂ y para licuarlo a 20K es 30-35 kJ/g H₂. Además, cuando se emplean temperaturas criogénicas en el almacenamiento de H₂ en sólidos carbonosos porosos el tiempo latente o tiempo necesario para perder el H₂ almacenado por fugas a través de la válvula de venteo, es muy superior al que tiempo latente en el almacenamiento de H₂ licuado. En concreto, el tiempo latente en el almacenamiento en sólidos carbonosos porosos a 77K, es 6 veces superior al tiempo latente en el almacenamiento de H₂ licuado. a 20K.

El empleo de materiales carbonosos dopados con ciertos metales que proporcionen mayores capacidades de almacenamiento de hidrógeno que los materiales no dopados, mediante un proceso conocido como “*spillover*” se muestran como una alternativa para aumentar la interacción adsorbato/adsorbente. Los estudios de orbitales moleculares *ab initio* han mostrado que la adsorción de átomos de hidrógeno es exotérmica y estable sobre los planos grafiticos basales. En el fenómeno de *spillover* tiene lugar una transferencia de electrones a través de aceptores a lo largo del soporte; este proceso no sólo modifica la naturaleza química del soporte sino que puede incluso activar el material previamente inactivo, y/o inducir la fisisorción de hidrógeno. La disociación de hidrógeno sobre el metal y el posterior *spillover* hacia el soporte carbonoso depende mucho de los enlaces químicos formados en la interfase, y también de la interacción entre el metal y el soporte, y de los aceptores presentes en este último. Por lo tanto, la

optimización previa del soporte es fundamental, tanto para que presente propiedades texturales adecuadas para la adsorción de hidrógeno, como para que interaccione adecuadamente con el metal. La mayoría de los estudios realizados sobre el efecto *spillover* se han realizado utilizando como soporte óxidos, y los grupos oxigenados son los que generalmente actúan como receptores en el proceso.

Los MOF "*Metal-Organic Frameworks*" son una clase de materiales nanoporosos que se encuentran en desarrollo. Están constituidos por óxido y tereftalato de zinc, y han sido descritos como esponjas de cristal, tienen poros o aberturas nanométricas capaces de almacenar grandes cantidades de hidrógeno. El inconveniente que presentan es la necesidad de bajas temperaturas para conseguir grandes capacidades de almacenamiento.

Las zeolitas son materiales cristalinos nanoporosos y son considerados como un método avanzado de almacenamiento de hidrógeno, llegando a almacenar una capacidad media máxima del 2,5% en masa (kg/m^3). Son química y térmicamente resistentes, presentan una buena reproducibilidad estructural, son seguras, respetuosas con el medio ambiente y están disponibles a bajo coste. La investigación actual se centra en aumentar su capacidad de adsorción de hidrógeno a través de modificaciones químicas en su estructura.

2.5.5.- Otros sistemas de almacenamiento.

Las microesferas de cristal, poseen un diámetro que varía entre 25 μm y 500 μm y la pared tiene un espesor de alrededor de 1 μm . Se cargan con hidrógeno a alta presión y en un intervalo de temperaturas que va de 473 a 673 K. Estas esferas de cristal se calientan de modo que el aumento de temperatura hace permeable la pared de cristal, y el hidrógeno es capaz de entrar y atravesarla. Se llenan por inmersión de gas hidrógeno a alta presión y a continuación se enfrían a temperatura ambiente. A esta temperatura, el cristal es impermeable al hidrógeno y este se queda atrapado en las esferas. Una vez que está almacenado, la presión en el tanque tiene que ser baja, por cuestiones de seguridad. Las microesferas son inertes, resisten a la contaminación y sólo requieren moderadas energías para liberar el hidrógeno. Éste puede liberarse calentando ó rompiendo la esfera. En el caso de romperla, la esfera no podría reutilizarse y por tanto no es una opción muy favorable. La capacidad de almacenamiento de las esferas de cristal es alrededor de 5-6 % en masa, a presiones de entre 20 y 49 MPa. Este método presenta la ventaja de ser un medio de almacenamiento de hidrógeno portátil, seguro (al trabajar con bajas presiones), económico, recargable y reciclable.

Los nanotubos de nitruro de boro son equivalentes a los nanotubos de carbono en términos de ventajas, pero se basan en nitruros de boro, en vez de carbono. Estos materiales están todavía en desarrollo y la investigación se centra en verificar las capacidades de

almacenamiento de hidrógeno; es decir, conseguir reproducibilidad en los resultados, y conocer mejor el mecanismo por el cual se producen los ciclos de adsorción y desorción.

Almacenamiento en compuestos químicos. El hidrógeno se encuentra normalmente en forma de compuestos químicos estables en la naturaleza. Este hidrógeno podría liberarse mediante reacciones químicas que dependerían de la naturaleza del compuesto del que forma parte. En estos casos no sería necesario almacenar el hidrógeno, sino que se generaría “in situ” para su utilización, mediante el empleo de varias técnicas como el “cracking” del amoníaco o del metanol.

Los “Bulk Amorphous Materials” (BAMs), son materiales metálicos basados en sistemas de aleaciones multicomponente como los basados en Ti-Al-Fe. Presentan cinéticas rápidas, de bajo coste y resistencia a la fragilización y desintegración. Se obtienen mediante el empaquetado sin presiones y con defectos de poro de tamaño y localización controlada en fase líquida súper enfriada. Los defectos de poro, dan lugar a los huecos intersticiales para el almacenamiento del hidrógeno.

2.5.6.- Ventajas e inconvenientes de los sistemas de almacenamiento.

Para poder comparar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno con las diferentes tecnologías existentes hoy en día, se suele emplear el porcentaje en masa. Sin embargo, en raras ocasiones se especifica la base del porcentaje. Es importante distinguir cuando nos referimos a la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de un material o cuando lo hacemos respecto a la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en un sistema. En el primer caso, se toma la masa de hidrógeno almacenado dividido por la masa del hidrógeno almacenado más el material que lo almacena, por el contrario el segundo caso hace referencia a la masa de hidrógeno almacenado dividido por la masa del hidrógeno almacenado más el material que lo almacena, más el recipiente de almacenamiento. Se puede observar, que cuando nos referimos al almacenamiento del hidrógeno en un sistema, estamos teniendo en cuenta el recipiente de almacenamiento, lo cual supone unos valores de capacidad de almacenamiento mucho menores.

Además de la capacidad gravimétrica, es importante tener en cuenta la capacidad volumétrica, es decir, la masa de hidrógeno almacenado por unidad de volumen, sobre todo cuando se trata de aplicaciones móviles y portátiles. Ya que no siempre se especifica si se refiere a la masa de hidrógeno almacenado por unidad de volumen del material utilizado para almacenar hidrógeno, o por unidad de volumen del sistema global (material más recipiente) empleado en el almacenamiento. En la tabla 2.6, se pueden ver las capacidades de las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en términos de peso y volumen.

No obstante, para comparar las distintas tecnologías disponibles para el almacenamiento de H₂, no es suficiente conocer la capacidad gravimétrica y volumétrica, sino que también debemos evaluar el tiempo de llenado del tanque, la presión y temperatura necesarios durante el llenado del mismo, la eficiencia energética tanto en la carga como en la descarga del H₂, las pérdidas por fugas o la capacidad de amoldarse a distintas formas y espacios, entre otros parámetros.

Tecnología de almacenamiento	Peso (kWh/kg)	Volumen (kWh/l)
Hidruros metálicos complejos	0.8	0.6
Hidruros químicos	1.6	1.4
Gas (689.47 bar / 10000 psi)	1.9	1.3
Hidrógeno líquido	2.0	1.6

Tabla 2.6.- Capacidades de almacenamiento de hidrógeno de las diferentes tecnologías.

En la figura 2.11 se compara de forma esquemática el peso y volumen de los tanques necesarios para almacenar 6 kg de hidrógeno en estado gaseoso a una presión de 345 bar (5003.80 psi), en estado líquido a una temperatura de 20 K (-253°C) y absorbido en carbón activo a una temperatura de 77K (-196°C).

De los datos mostrados, se aprecia que el almacenamiento del hidrogeno como líquido, nos permite emplear tanques con menor peso y volumen (del orden de la mitad que almacenado como gas) que el almacenaje como H₂ licuado o contenido en un sólido poroso carbonoso. Este último sistema representa una situación intermedia, ya que como puede observar, a pesar de tener el mismo peso del tanque de almacenamiento del hidrógeno comprimido, hay una diferencia de 90 litros en volumen. Si el H₂ se almacenara a 689 bar (9993.10 psi) el volumen del tanque sería más pequeño (del orden del correspondiente al material carbonoso poroso) pero sería mucho más pesado.

En la actualidad, el único sistema de almacenamiento que está totalmente disponible comercialmente para su uso en aplicaciones móviles, tales como la náutica o la automoción es el hidrógeno comprimido. El almacenamiento del hidrógeno en estado líquido, implica el empleo de tanques con un elevado grosor de pared, la cual debe aportar consistencia y resistencia estructural además de aislamiento térmico. Esto complica bastante la fabricación y mantenimiento de estos dispositivos, así como la posibilidad de adecuar las formas de los tanques al espacio disponible. No obstante, los tanques empleados para almacenar H₂ líquido tienen en sí un menor coste que los empleados para almacenar hidrógeno en estado gaseoso, esto es debido a la menor presión de trabajo, pero los sistemas de refrigeración, aislamientos y compresores para las pérdidas de gas entre otros, hace que el sistema global sea bastante caro.

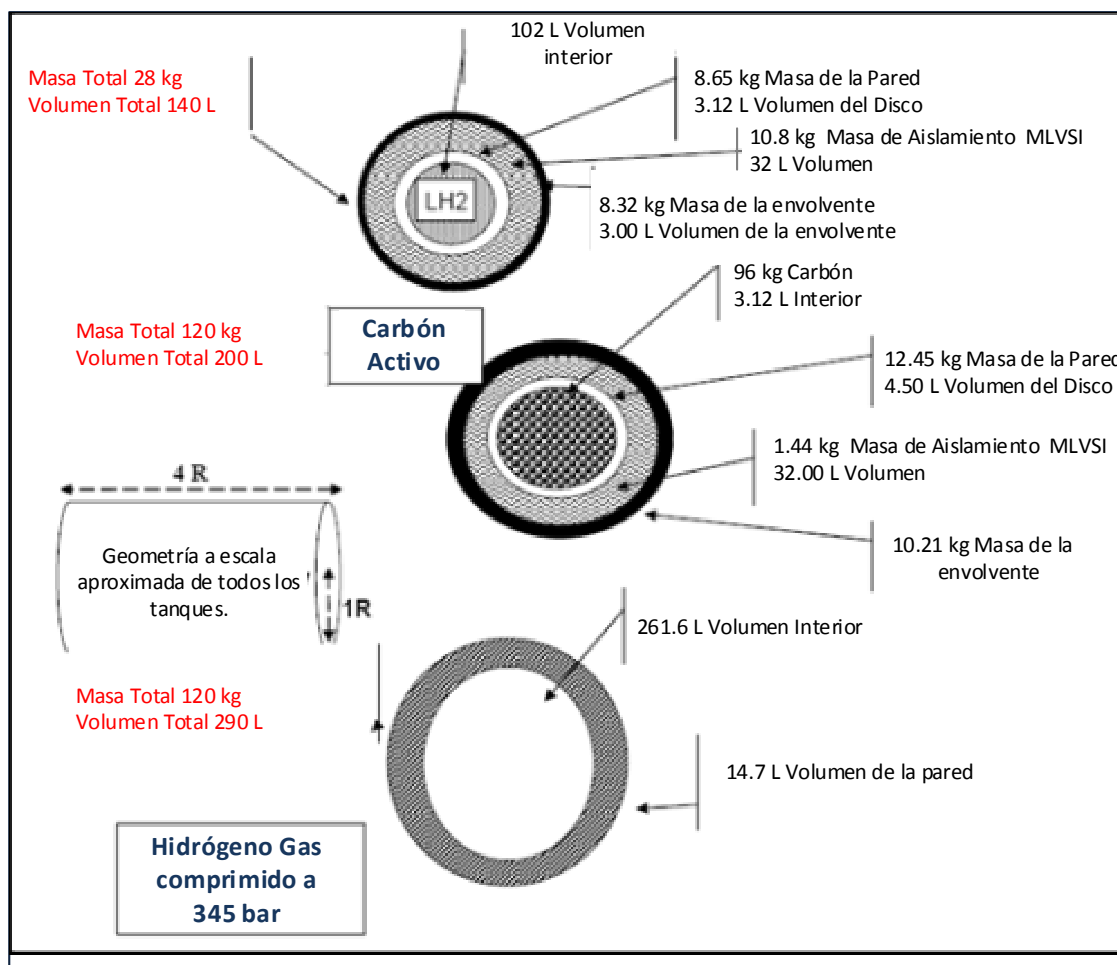


Figura 2.11.- Esquema comparativo de los tanques necesarios para almacenar 6 Kg de hidrogeno en fase sólida, líquida y almacenado en sólidos carbonosos.

Los tanques para almacenar hidrogeno comprimido deben estar contruidos con materiales de refuerzo para soportar las altas presiones, estos materiales suponen casi la mitad del coste total del tanque. Existen tanques en el mercado a 35 MPa (350 bar), fabricados a partir de materiales compuestos que almacenan hasta 40 kg de H₂. Los tanques más pequeños y a mayor presión son lógicamente más caros. Se supone que la baja producción y distribución de este tipo de recipientes encarece bastante el coste actual, si su distribución aumentara, los precios bajarían.

El almacenamiento de hidrogeno, mediante el empleo de hidruros y sólidos carbonosos porosos, están todavía en fase de laboratorio y/o prototipo, por lo que no se puede hacer todavía una valoración de costes realista. Sin embargo, se debe tener en cuenta el bajo coste de los materiales carbonosos como adsorbentes, en comparación con otros materiales. El precio de los hidruros metálicos es razonable, pero presentan grandes problemas de durabilidad, y la regeneración es costosa. Los complejos de hidruros dan lugar a unos costes del sistema mucho más elevados, debido a los recipientes especiales con control de presión y temperatura que son

necesarios. Los hidruros de magnesio son, en cambio, los que presentan unos costes más bajos, sin embargo, tienen otros problemas asociados.

Actualmente, la empresa ITM Power, compañía registrada en Inglaterra dedicada al diseño y fabricación de Sistemas de Energía de Hidrógeno para el Almacenamiento de Energía y la Producción de Combustible Limpio, ha desarrollado una gama de materiales y tecnologías que le permiten reducir el coste de producción de hidrógeno a 4.86 Euros/kg teniendo en cuenta todos los factores contables, entre otros capital, amortización a 10 años, gasto energético para producir y margen de beneficio empresarial. Esta compañía ha conseguido bajar increíblemente el listón marcado por la Unión Europea que para el año 2025 fija su objetivo en 5,50 Euros/Kg de hidrógeno.

Conclusión: *Para la alimentación de nuestra pila, tanto en el laboratorio como en el barco, el H₂ comprimido es la tecnología más favorable, ya que aunque por valores de capacidad gravimétrica y volumétrica el hidrógeno licuado y algunos hidruros parecen ser los más ventajosos, actualmente, distintos problemas asociados disminuyen notablemente la eficiencia de estas tecnologías. Además, el hidrogeno comprimido, se suministra comercialmente embotellado, lo que nos evita realizar la fabricación de un tanque específico para el almacenaje del mismo.*

Capítulo 3: Las Pilas de Combustible.

3.1.- INTRODUCCIÓN

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos, en los que se transforma directamente la energía de una reacción química, en energía eléctrica. Esta transformación la realizan con una elevada eficiencia y unas reducidas emisiones contaminantes, lo que las convierte en una fuente de energía alternativa muy ventajosa.

Una pila de combustible consiste en un ánodo donde se inyecta el combustible (comúnmente hidrógeno o gas natural) y un cátodo donde se introduce un oxidante (normalmente aire u oxígeno). Ambos electrodos están separados por un electrolito iónico conductor.

El interés por estas tecnologías, se ha ido incrementando en los últimos años debido a la búsqueda de energías renovables y poco contaminantes. No obstante, los primeros estudios que conducen al funcionamiento de la pila de combustible se remontan a principios de 1800 con Sir William Grove, reconocido como el descubridor en 1839. A lo largo del resto del siglo, los científicos intentaron desarrollar las celdas de combustible por medio de diferentes combustibles y electrolitos.

En 1959 el ingeniero británico Francis Thomas Bacon desarrolló una célula estacionaria de combustible de 5 kw, capaz de accionar una máquina de soldadura, esto condujo, a que las patentes de Bacon licenciadas por Pratt y Whitney fuesen utilizadas en los años 60 en el programa espacial de Estados Unidos (Programas Gemini y Apolo) para proveer a los astronautas de electricidad y de agua potable a partir del hidrógeno y oxígeno disponibles en los tanques de la nave espacial.

La Membrana de Intercambio de Protones (PEM, "Proton Exchange Membrana") fue utilizada en siete misiones espaciales. A pesar de su éxito en estos programas espaciales, estas celdas de combustible utilizadas con oxígeno puro e hidrógeno como gases reactivos fueron costosas y no viables comercialmente, quedando limitadas a aplicaciones donde el coste no era un problema. El interés de la NASA continuó durante muchos años con un mayor desarrollo, también impulsado por la crisis energética de 1973.

Las celdas de combustible no se convirtieron en una opción real de uso (aplicación en el sector del transporte) hasta, finales del siglo XX, gracias a varios avances entre los que destacan un catalizador con menos cantidad de platino (menor coste) y el empleo de electrodos de película fina. A partir aquí y hasta el momento actual, no se ha dejado de trabajar en el desarrollo de las pilas PEM.

3.2.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

La celda de combustible es un dispositivo de conversión directa de energía química de un combustible en electricidad sin ningún tipo de conversión térmica intermedia ni procesos mecánicos. La energía se libera cuando un combustible reacciona químicamente con el oxígeno del aire. En una pila de combustible, la reacción se produce *electroquímicamente* y la energía se libera como una combinación de tensión de corriente continua y calor. La energía eléctrica se puede utilizar para hacer un trabajo útil directamente mientras que el calor será perdido o utilizado para otros fines.

Una característica básica de las celdas de combustible es que si les suministro más hidrogeno y oxigeno, obtendré más corriente eléctrica. En una aplicación efectiva, se puede aplicar una variedad de cargas eléctricas a la celda de combustible.

Por el contrario en un motor de combustión interna, la reacción libera la energía en forma de calor (gases que expansionan su volumen), energía que se utiliza para obtener trabajo útil empujando un pistón.

En las pilas galvánicas, o voltaicas, las reacciones electroquímicas forman la base en la cual la energía química se convierte en energía eléctrica. Una celda de combustible de cualquier tipo es una pila galvánica, como lo es una batería. En cambio, en las celdas *electrolíticas*, la energía eléctrica se convierte en energía química.

3.2.1 Pila galvánica, voltaica o electroquímica.

El primer diseño de pila galvánica, se basó en el descubrimiento de Luigi Galvani en 1780, quien durante un experimento observó que si dos metales diferentes (cobre y zinc, por ejemplo) se ponían en contacto y, a continuación, ambos tocaban diferentes partes de un nervio de un anca de rana, hacían que se contrajesen los músculos de dicha extremidad. A este fenómeno lo denominó "electricidad animal". La pila voltaica inventada posteriormente por Alessandro Volta en 1800, es similar a la pila galvánica.

Todas las celdas galvánicas constan de un electrolito y dos electrodos (un ánodo y un cátodo). El ánodo o electrodo negativo, está hecho de una sustancia que se *oxida* fácilmente (libera electrones). El cátodo, o electrodo positivo, se hace de una sustancia que es fácilmente *reducida* (acepta electrones). Cuando se utilizan conjuntamente, el ánodo y el cátodo son las dos mitades de una reacción espontánea de *oxidación-reducción*. Es decir, el ánodo y el cátodo se encuentran en un estado de energía alta y desean combinarse para lograr estado de menor energía.

Los elementos reactivos deben estar en contacto entre sí a fin de que los electrones puedan ser intercambiados y formar enlaces, de manera que se produzca una reacción química. El ánodo y el cátodo no pueden estar en contacto directo, ya que una podría ocurrir una reacción donde sus superficies estén en contacto, manifestándose la energía en forma calor sin obtener trabajo. Con el fin de aprovechar la energía eléctrica disponible, los electrodos deben estar separados de tal manera que los electrones puedan fluir desde el ánodo al cátodo a través de una carga externa sin dejar de estar en contacto para permitir que la reacción tenga lugar. Para lograr esto, el ánodo y el cátodo están separados por un electrolito.

El electrolito es la sustancia encargada de conducir los iones que son átomos que han adquirido una carga eléctrica a través de la pérdida o ganancia de uno o más electrones. Los iones con carga positiva se denominan "cationes" y los iones con una carga negativa (han ganado uno o más electrones) se conocen como iones negativos o "aniones". Cuando un ión se mueve a través de un electrolito, la carga se mueve con él.

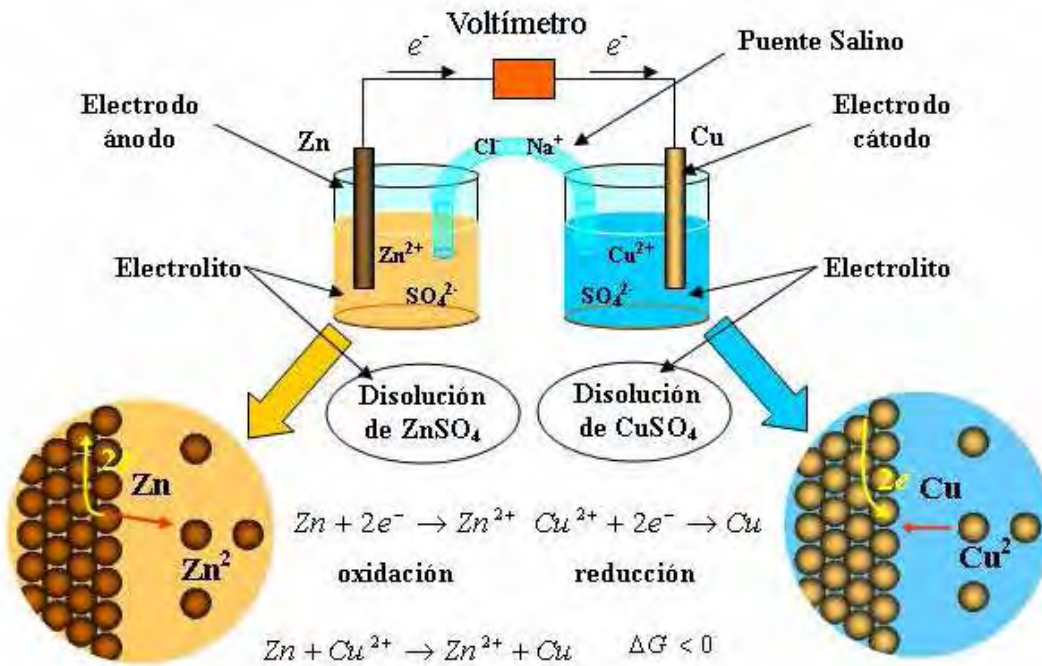


Figura 3.1.- Pila galvánica.

El electrolito no conduce la electricidad, su función es conducir los iones. La electricidad es el flujo de electrones libres a través de un metal. Si el electrolito fuera para conducir la electricidad además de los iones, el ánodo y el cátodo se cortocircuitarían como si estuvieran en pleno contacto. Es esta dualidad de conducción iónica y aislamiento eléctrico la que permite que los electrolitos formen la base esencial de todas las pilas galvánicas.

El material del ánodo se disuelve en el electrolito formando cationes con carga positiva y dejando una correspondiente acumulación de electrones libres en el mismo. Esta acumulación de

electrones se manifiesta como una carga negativa. Por el contrario, el material del cátodo tiene una tendencia a atraer a los cationes positivos que se originan. La acumulación de cationes en el cátodo se manifiesta como una carga positiva. Por lo tanto, existe un potencial eléctrico entre el cátodo y el ánodo. Sin embargo, esto es una situación estática ya que la carga solo se acumula hasta un punto a partir del cual la atracción química es insuficiente para generar iones adicionales. Esta carga se puede medir como la tensión en circuito abierto (OCV, "Open-Circuit Voltage") y es una característica del material del electrodo elegido y en cierto modo de la temperatura de la celda.

La reacción química entre el ánodo y el cátodo no puede llegar hasta el final, si los electrones permanezcan atrapados en el ánodo. Estos electrones son esenciales para la formación del producto final de reacción y la liberación de la energía de reacción. Para liberar los electrones, el circuito eléctrico entre los dos electrodos debe ser completado a través de una ruta de flujo externo. Si la ruta de flujo externo incluye una carga, los electrones realizan un trabajo útil en su camino hacia el cátodo. Una vez que el ánodo y el cátodo están conectados, el superávit de electrones de la corriente del ánodo al cátodo, completan la reacción química. A medida que el ánodo pierde su exceso de electrones y por lo tanto su carga negativa, más iones catódicos se disuelven para producir un nuevo exceso de electrones. A medida que el cátodo gana electrones, pierde su carga positiva, por lo que más cationes positivos son atraídos hacia éste. Los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo a través de la carga externa y luego se unen a los iones cargados positivamente que migran a través del electrolito. Este flujo continúa hasta que el ánodo se consume, el electrolito no esté en condiciones de proporcionar más cationes, o la ruta de carga sea retirada. La velocidad de reacción se fija por el tamaño de la carga.

En general, el cambio químico neto que se produce dentro de una pila galvánica es el resultado de las reacciones individuales en el ánodo y el cátodo, que siempre se mantienen equilibradas de tal manera que el mismo número de electrones que se ganan también se pierden. Como la reacción se completa, el compuesto que se forma es el producto de la reacción en el cátodo. El producto de la reacción depende de la composición química de los electrodos y puede ser un gas, un líquido o un sólido. Este compuesto producido debe suprimirse, pues de lo contrario podría bloquear las zonas de la reacción, lo cual disminuiría aún más la velocidad de la reacción.

Los diseños de las pilas galvánicas incluyen a menudo una *barrera porosa* entre el ánodo y el cátodo. Esta barrera es permeable al electrolito, pero reduce el flujo de iones y ofrece una separación mecánica entre los electrodos. El electrolito es el corazón de cada pila galvánica y da lugar a los diferentes diseños de baterías y pilas de combustible. Los electrolitos pueden ser líquidos o sólidos y por lo general incluyen sal, ácido o compuestos alcalinos. Independientemente de su composición, los electrolitos deben tener buena conductividad iónica mientras no son conductores eléctricos, no ser reactivos con los materiales de los electrodos y tener pocos cambios en las propiedades con las variaciones de las temperaturas.

3.2.2 Pila de combustible.

En una pila de combustible, el combustible y los gases oxidantes comprenden entre sí el ánodo y el cátodo, respectivamente. Así, la estructura física de una celda de combustible es una en la que los gases son dirigidos a través de canales de flujo a ambos lados del electrolito. Diferentes electrolitos conducen distintos iones específicos, dando lugar a los diferentes tipos de pilas. Los electrolitos pueden ser líquidos o sólidos, y funcionar a alta o a baja temperatura. A baja temperatura las pilas de combustible tienden a necesitar un catalizador de metal noble, por lo general platino, para alentar a las reacciones de los electrodos, mientras las pilas de combustible no alcanzan una alta temperatura.

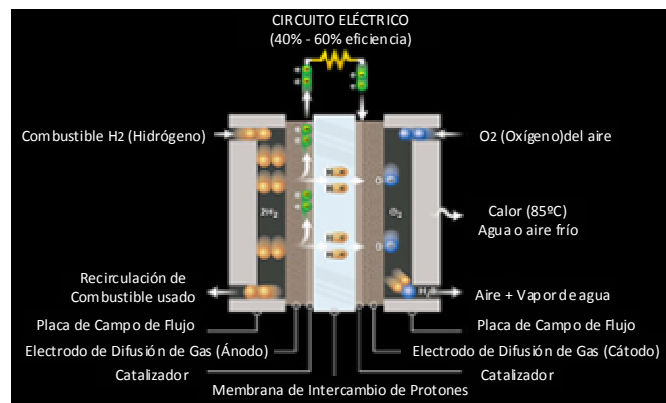
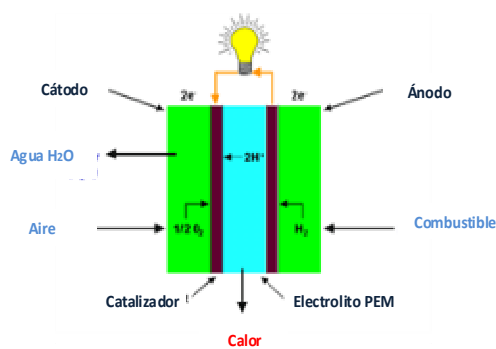


Figura3.2.- Esquema del funcionamiento de una pila de combustible.

Una pila de combustible puede funcionar usando una variedad de combustibles y oxidantes. El hidrógeno ha sido reconocido como el combustible más eficaz para el uso práctico de celdas de combustible, ya que tiene mayor reactividad electroquímica que otros combustibles, como los hidrocarburos o alcoholes. Incluso las celdas de combustible que operan directamente con combustibles distintos al hidrógeno, tienden a descomponerse primero en hidrógeno y otros elementos antes de que la reacción se lleve a cabo. El oxígeno es la opción obvia del oxidante debido a su reactividad y su abundancia por encontrarse en el aire.

3.2.3 Análisis comparativo entre las pilas de combustible y las baterías.

Tanto las pilas de combustible como las baterías son pilas galvánicas compuestas de un ánodo y un cátodo en contacto con un electrolito. También son similares en la forma de generar energía eléctrica mediante la conversión de energía química, saltando de un estado de alta energía a otro estado de menor nivel por vía de una reacción electroquímica.

Una de las diferencias entre las pilas de combustible con respecto a las baterías es la naturaleza de su ánodo y cátodo. En una batería, el ánodo y el cátodo son metales; para el ánodo se emplean normalmente zinc o litio y para el cátodo óxidos metálicos. En una pila de combustible,

el ánodo y el cátodo se componen a menudo de gases en contacto con un catalizador de platino para promover la reacción que genere la energía. El ánodo esta compuesto por hidrógeno, o una mezcla rica de gas-hidrógeno y el cátodo lo forma el oxígeno o aire.

También se diferencian en la forma de almacenar los reactivos químicos. En una batería, el ánodo y el cátodo forman parte integrante de la estructura de la batería y se consumen durante su uso. Por lo tanto, una batería sólo puede funcionar hasta que estos materiales son totalmente consumidos, después de lo cual debe sustituirse o recargarse, en función de la naturaleza de los materiales. Mientras que los reactivos químicos en una pila de combustible, se alimentan de una fuente externa para que sus materiales de construcción no sean consumidos y no necesiten ser recargados. Por tanto una pila de combustible continuará operando siempre que los reactivos sean suministrados y los productos de la reacción eliminados.

3.2.4.- Ventajas del empleo de una pila de combustible.

Cuando comparamos las pilas de combustible con otros sistemas de generación de energía, fundamentalmente las baterías y los motores de combustión, estas presentan una serie de ventajas y de inconvenientes. A continuación se enumeran las ventajas del empleo de las pilas de combustible:

- Mayor rendimiento.

Las celdas de combustible presentan una buena respuesta a las distintas variaciones en la demanda de carga (los sistemas dotados de reformador son más lentos que los sistemas que trabajan con hidrógeno puro). Los motores térmicos funcionan con mayor eficiencia a su velocidad de diseño mostrando una rápida disminución a cargas parciales, mientras que las pilas de combustible, al igual que las baterías, exhiben una mayor eficiencia con carga parcial que a plena carga y con menos variaciones en todo su rango de operación.

Además, los sistemas de pilas de combustible funcionan con una eficiencia termodinámica más alta que la de los motores térmicos, tales como motores de combustión interna y turbinas, ya que estos convierten la energía química en calor por medio de la combustión y hacen uso del calor para obtener trabajo útil.

El rendimiento termodinámico máximo, o rendimiento de Carnot de una máquina térmica es: $\eta_{\max} = 1 - T_2/T_1$. Esta fórmula indica que si aumenta la temperatura del foco Caliente (T_1) y disminuye la temperatura del foco frío (T_2), obtendremos una mayor eficiencia termodinámica. La temperatura del foco caliente podemos aumentarla (salvando consideraciones de requerimientos de materiales), pero la del foco frío no puede ser inferior a la temperatura ambiente.

La ventaja de las celdas de combustible es que no emplean la combustión, por tanto su eficiencia no está relacionada con la máxima temperatura de funcionamiento, sino con la salida de los gases fríos que es significativamente menor que en los sistemas de combustión, (en un motor de combustión interna, la temperatura de entrada es la temperatura de funcionamiento del motor, que es muy inferior a la temperatura de ignición). Como resultado, la eficiencia de la conversión de la energía puede ser significativamente mayor (la reacción electroquímica frente a la reacción de combustión). De todos modos, la eficiencia de la reacción electroquímica no es la misma que la eficiencia global del sistema. En la figura 3.3 se puede observar la eficiencia de las pilas de combustible comparada con otros sistemas de generación de energía eléctrica.

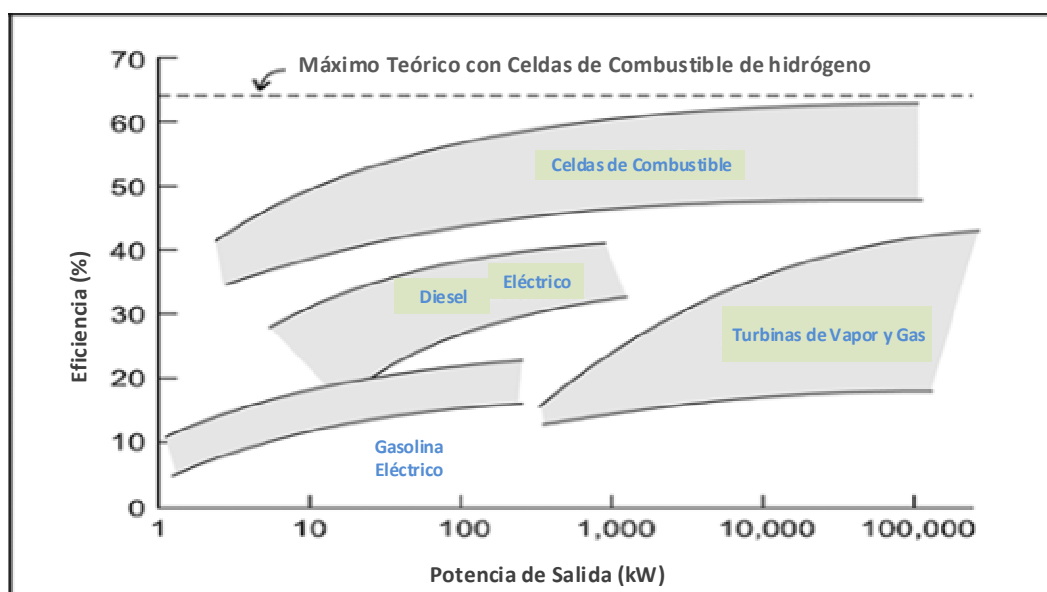


Figura 3.3.- Comparación de Eficiencias de distintos Sistemas de Generación de Energía Eléctrica.

- Permiten la Cogeneración.

Las pilas de combustible generan además de energía eléctrica, agua caliente y calor de grado medio, y ambos pueden ser utilizados potencialmente en asociación con aplicaciones industriales o domésticas. Cuando se hace esto, se aumenta la eficiencia total del sistema.

- Producen una baja contaminación.

Las pilas de combustible que operan con hidrógeno puro no producen emisiones nocivas, generando como únicos subproductos agua y calor. Las pilas que operan con combustible reformado rico en hidrógeno producen algunas emisiones nocivas dependiendo de la naturaleza del proceso, aunque siempre menores que las que puede emitir un motor de combustión interna que funcione con combustibles fósiles convencionales. No obstante, los motores de combustión

interna que funcionan con hidrógeno puro pueden ser diseñados para funcionar emitiendo casi cero emisiones nocivas, aunque debido a su sistema de lubricación, pueden llegar a quemar una pequeña cantidad de aceite.

- Permiten flexibilidad en el empleo de combustibles.

Aunque el combustible más idóneo es el hidrógeno puro, también se pueden emplear múltiples combustibles, en concreto cualquier hidrocarburo combustible líquido o gas, entre los que se encuentran el propano, el gas natural, el metanol, el etanol, el gasoil y la gasolina. Los cuales pueden ser empleados como fuente de átomos de hidrógeno de la pila.

- No necesitan ser recargadas.

Los sistemas de celdas de combustible deben ser re-aprovisionados de combustible, lo que supone mucho menos tiempo que realizar la carga de una batería. De este modo proporcionan una mayor versatilidad dependiendo del tamaño del tanque de almacenamiento

- Permiten la conexión a red para aumentar la capacidad de producción de energía.

Cuando se necesita complementar la demanda de energía de red, las pilas de combustible permiten a las empresas aumentar la capacidad de red, sin necesidad de invertir el capital necesario para la construcción de nuevas centrales. Si las comparamos con las plantas de energía eólica o fotovoltaica, a las pilas de combustible no les afectan las condiciones meteorológicas ni la hora del día. Además, las pilas de combustible ofrecen libertad respecto a la fiabilidad de la red eléctrica, siendo muy útiles como generadoras de energía de apoyo para el desarrollo de ciertas actividades críticas.

- Presentan bajos niveles de vibración y ruido.

Esto se debe a carecer de partes móviles (a excepción del sistema de enfriamiento por ventilación). Un sistema de pilas de combustible emite por lo general menos de la cuarta parte de ruido que un generador diesel o gas análogo.

3.2.5.- Inconvenientes del empleo de una pila de combustible.

En el apartado anterior se han expuesto las ventajas del empleo de las pilas de combustible, frente a otros sistemas de generación de energía, pero estas también presentan ciertos inconvenientes o desventajas, a continuación se realiza un análisis de los mismos.

- Obtención del hidrógeno.

El hidrogeno empleado hoy día como combustible en las pilas, tiene un precio elevado, esto es debido a que los actuales procesos de fabricación son caros y grandes consumidores de energía, y con frecuencia derivan en última instancia de combustibles fósiles (ver figura 3.4) Aún no se ha establecido una infraestructura de hidrógeno efectiva.

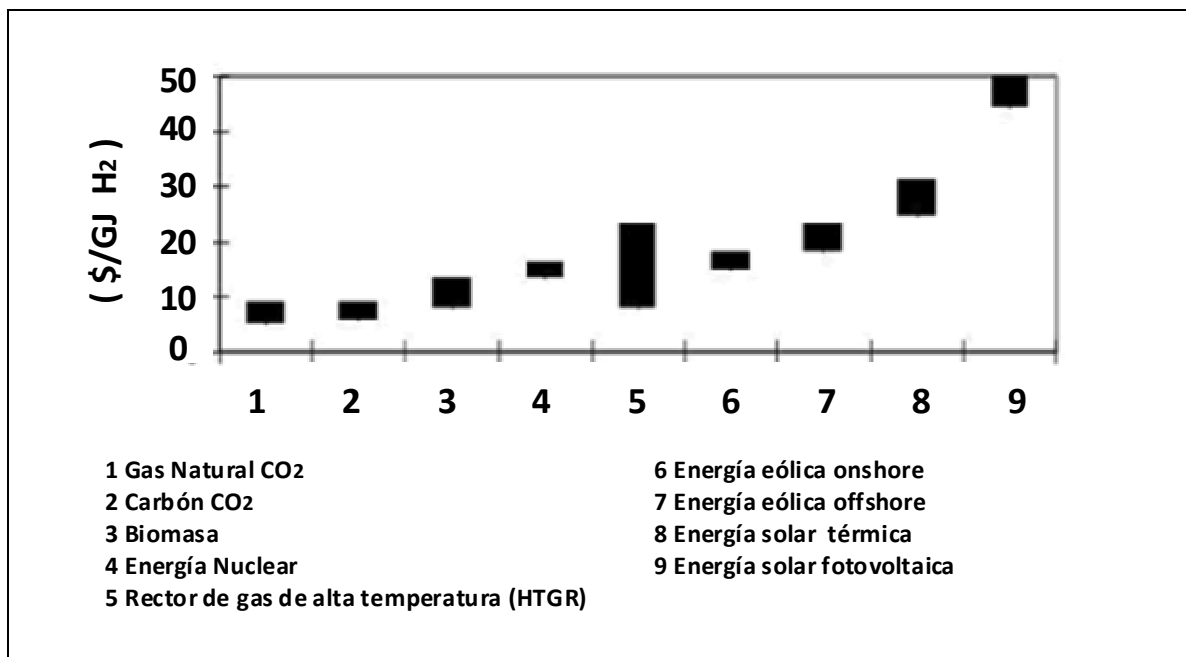


Fig. 3.4.- Coste de producción del hidrógeno (International Energy Agency "IEA").

- Almacenamiento del hidrógeno.

El almacenamiento, también presenta costes elevados, ya que va a tener que realizarse en tanques sometidos a altas presiones o trabajando a temperaturas criogénicas con valores inferiores a los -70°C (203 K). Esto exige la fabricación de recipientes adecuados y una mayor responsabilidad en su manejo.

- Coste de los elementos de la pila.

Aunque los precios de las pilas continúan bajando a un ritmo rápido, los materiales (oro, platino, nafion, circonio,...) y componentes (caudalímetros másicos, termopares, compresores, electroválvulas,...) tienen un coste elevado.

En el caso de las pilas empleadas hoy en día en el sector de la automoción, estas normalmente requieren el uso de un catalizador de platino para promover la generación de la reacción. Este platino se vuelve inactivo si entra en contacto con monóxido de carbono, ya que presenta sensibilidad hacia los venenos catalíticos. Debido a esto, las pilas de combustible

requieren combustible relativamente puro, libre de contaminantes. Estos contaminantes incluyen azufre, compuestos de carbono, y combustibles líquidos residuales (en función del tipo de celda de combustible) que puede desactivar la eficacia del catalizador de la pila de combustible destruyendo su capacidad de funcionar. Sin embargo, ninguno de estos contaminantes inhibe la combustión en caso de motores de combustión interna.

Por otro lado, las membranas de intercambio de protones que contienen las pilas, también tienen un alto precio y no deben secarse durante su uso o almacenamiento, ya que esto podría producir daños en la misma.

- Problemas de congelación del agua residual.

Las pilas de combustible generan agua pura como producto de la reacción. El agua residual de las pilas de combustible puede causar un daño irreversible por expansión si se permite la congelación de la misma. Durante la operación, los sistemas de celdas de combustibles generan el calor suficiente para evitar la congelación del agua residual en un ambiente normal de temperaturas, pero cuando se encuentran en un clima frío va a ser necesario el empleo de un sistema de calefacción, ya que las celdas de combustible deben ser mantenidas calientes o el agua residual debe ser eliminado antes de producirse la congelación de esta.

- Peso de las pilas.

Si las comparamos con los sistemas de combustión interna, las pilas de combustible son más pesadas. Aunque las celdas de combustible en sí no son excesivamente pesadas, el peso combinado de estas, más sus sistemas de apoyo y almacenamiento de combustible dan lugar a un mayor peso. Si estos sistemas incluyen además un reformador, aumentan aún más el peso. Es lógico no obstante pensar que a medida que se desarrollan nuevas tecnologías, ira disminuyendo el peso de los sistemas.

Por el contrario, si las comparamos con los sistemas de baterías, las pilas son más ligeras incluso aunque estos sistemas de baterías requieran menos equipos de apoyo.

- Sistemas de control y apoyo complejos.

Las pilas de combustible requieren de apoyo y sistemas complejos de control. La complejidad del sistema aumenta significativamente cuando las celdas de combustible operan con un reformador integrado en el sistema global.

3.3.- TIPOS DE PILAS DE COMBUSTIBLE.

La principal diferencia entre las pilas viene determinada por la temperatura de funcionamiento de estas. Esta temperatura de funcionamiento viene dada por el tipo de electrolito que empleen.

Las pilas de combustible de baja temperatura normalmente funcionan por debajo de 250°C (480°F). Las ventajas de estas pilas es que permiten un arranque rápido, sus materiales sufren menos problemas y son más fáciles de manejar en aplicaciones en vehículos, embarcaciones, avionetas, etc. Como inconveniente, precisan de una fuente externa de hidrógeno, ya que debido a las bajas temperaturas a las que trabajan no permiten el reformado interior. Las pilas de combustible de baja temperatura más destacadas son:

- Pilas de combustible alcalinas (AFC, Alkaline Fuel Cells).
- Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cells).
- Pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM, Proton Exchange Membrane).

Las pilas de combustible de alta temperatura funcionan a un máximo de 600° C (1100°F). Al trabajar a tan altas temperaturas, permiten el reformado interno espontáneo de combustibles de hidrocarburos ligeros, como metano, en hidrógeno y carbono en presencia de agua. Esto es esencialmente un proceso de reformado con vapor y representa una gran ventaja, ya que permite el empleo de combustibles distintos al hidrógeno puro. Además, gracias al reformado interior elimina la necesidad de un procesador de combustible por separado. Todo esto conduce a un aumento global de la eficiencia de hasta un 15%.

Otras ventajas de este tipo de pilas es la generación de un alto grado de calor residual, que puede ser utilizado en los procesos aguas abajo para fines de cogeneración. Además reaccionan con facilidad y eficacia, sin necesidad de un catalizador de metal noble caro, como el platino.

Como inconvenientes, estas pilas que trabajan a altas temperaturas no permiten un arranque rápido y sufren problemas de materiales severos, ya que existen pocos materiales capaces de trabajar durante periodos prolongados a alta temperatura en un ambiente químico sin degradarse. Además, la cantidad de energía liberada por la reacción electroquímica se degrada a medida que aumenta la temperatura de la reacción.

La aplicación de este tipo de pila se ha centrado en centrales eléctricas estacionarias, donde la eficiencia del reformado interno y la capacidad cogenerativa superan a los

inconvenientes de la degradación material y de la puesta en marcha lenta. Las pilas de alta temperatura más empleadas son:

- Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cells).
- Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC, Solid Oxide Fuel Cells).

3.3.1.- Pilas de combustible alcalinas.

Este tipo de pilas fueron una de las tecnologías embrionarias, sus primeros usos estaban orientados a suministrar energía eléctrica y agua a las naves espaciales norteamericanas de los años 60.

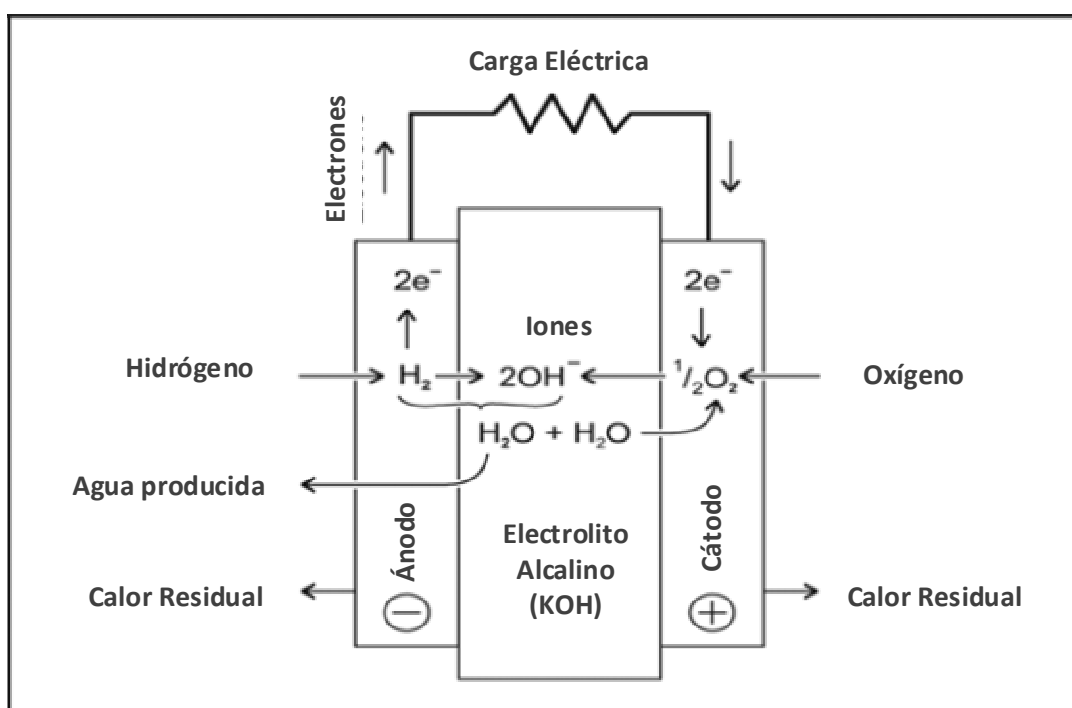


Figura 3.5.- Pila de Combustible Alcalina.

Las pilas alcalinas usan un electrolito que conduce iones hidroxilo (OH^-) del cátodo al ánodo. El electrolito puede ser móvil o inmóvil y está típicamente compuesto por un medio alcalino fundido como el hidróxido de potasio (KOH). Esto da lugar a dos tipos de pilas alcalinas.

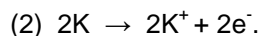
- Las pilas de combustible de electrolito alcalino móvil, las cuales utilizan un electrolito líquido que circula continuamente entre los electrodos. El agua producida y el calor residual diluyen y calientan al electrolito, pero se eliminan de la celda para que circule el electrolito.
- Las pilas de combustible de electrolito alcalino inmóvil, estas utilizan un electrolito que consiste en una pasta espesa retenida por las fuerzas capilares dentro de una matriz de

soporte poroso. La propia pasta proporciona juntas de gas en los bordes de la celda. El agua producida se evapora en la corriente de la fuente de hidrógeno gas al ánodo en el que posteriormente es condensada. El calor residual se elimina por medio de un refrigerante circulante.

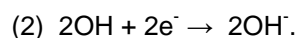
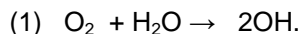
Las pilas alcalinas de combustible trabajan aproximadamente entre 65 y 220 °C y una presión de 1 bar (15 psi). Cada celda puede producir entre 1,1 y 1,2 VDC.

Estas pilas, producen la energía mediante una reacción de reducción- oxidación entre el hidrógeno y el oxígeno. En el ánodo se produce la oxidación del hidrógeno, produciendo agua y soltando dos electrones.

Las reacciones en el ánodo son:

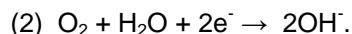
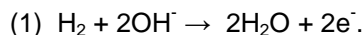


Las reacciones en el cátodo son:



Los iones OH^- se conducen a través del electrolito desde el cátodo al ánodo por la atracción reactiva del hidrógeno y el oxígeno, mientras que los electrones son forzados a través de un circuito externo del ánodo al cátodo.

Combinando las reacciones del ánodo y el cátodo, las reacciones generales de la celda son:



Durante la reacción, la celda de combustible produce agua que debe ser eliminada para facilitar la nueva reacción. La electricidad y el calor son productos de esta reacción.

Este tipo de pilas presenta una serie de ventajas como son:

- Permiten tiempos rápidos de puesta en marcha.
- Trabajan a bajas temperaturas, por tanto los materiales sufren menos corrosión.
- Tienen altos rendimientos, pudiendo alcanzar valores del 65%.

- Presentan costes más bajos de fabricación debido a los catalizadores requeridos por sus electrodos, ya que estos son de tipos muy variados, siendo realmente económicos en comparación con los empleados en otras pilas.
- Tienen relativa facilidad de operación, bajo peso y volumen contenido.

Como desventajas:

- Necesitan combustibles puros. El oxidante debe ser oxígeno puro o aire que ha sido lavado, libre de dióxido de carbono y el combustible debe ser hidrógeno puro debido a la presencia de óxidos de carbono en el reformado. Esto es debido a que son muy intolerantes a las emisiones de CO_2 (alrededor de 350 ppm máximo) y un poco intolerante con las emisiones de CO . Esto es una desventaja grave y limita el tipo de oxidante y el combustible que se pueden utilizar en una pila alcalina
- Las que funcionan con electrolito líquido, presentan los problemas del manejo de líquidos.
- Su vida media es relativamente corta.

3.3.2.- Pilas de combustible de ácido fosfórico.

La Pila de Combustible de Ácido Fosfórico utiliza este como electrolito. Este electrolito conduce los iones de hidrógeno (H^+) desde el ánodo al cátodo. Este se encuentra en estado líquido contenido en una matriz de carburo de silicio.

Las pilas de combustible de ácido fosfórico trabajan entre 150 y 205°C y a una presión de 1 bar (15 psi). Cada celda puede producir aproximadamente hasta 1,1 VDC.

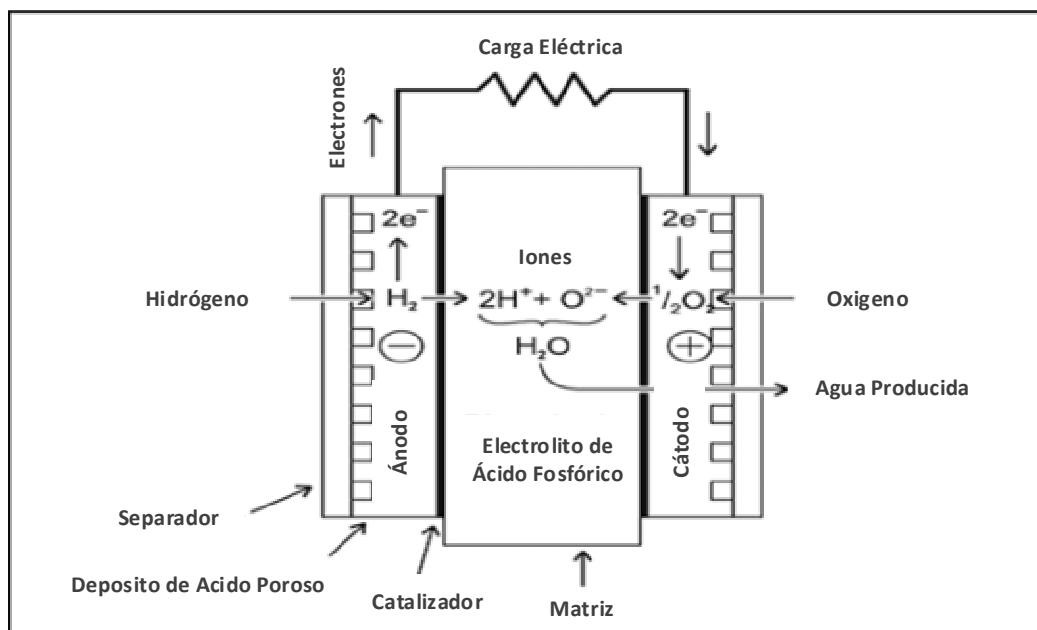


Figura 3.6.- Pila de Combustible de Ácido Fosfórico.

Las pilas de combustible de ácido fosfórico hacen reaccionar hidrógeno con oxígeno. Los iones son conducidos a través del electrolito desde el ánodo al cátodo por la atracción reactiva del hidrógeno al oxígeno, mientras que los electrones son forzados a través de un circuito externo.

La reacción en el ánodo es: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$.

La reacción en el cátodo es: $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

La reacción general de la celda es: $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

En la celda de combustible se produce agua que se va acumulando en el cátodo y debe ser continuamente eliminada para facilitar la reacción posterior.

Este tipo de pilas presenta una serie de ventajas como son:

- Pueden utilizar como oxidante el aire que no esté lavado, y reformado de hidrocarburo como combustible, ya que toleran hasta un 30 % de dióxido de carbono.
- Trabajan a bajas temperaturas, aunque superiores a otras celdas de combustible de temperatura baja. Esto hace que generen una cantidad de calor residual que puede ser potencialmente utilizado en aplicaciones de cogeneración.
- Los electrolitos presentan características estables, con baja volatilidad incluso a temperaturas de funcionamiento de hasta 200 °C.

Como desventajas:

- Emplean un electrolito líquido corrosivo, que provoca problemas de deterioro en los materiales. Además, aunque la estructura porosa de matriz evita las fugas de electrolito por efecto capilar, algo de ácido si puede perderse (evaporación lenta) en los flujos de combustible y oxidante, por lo que tras unas horas de operación debe añadirse algo de ácido.
- Toleran un máximo del 2% de monóxido de carbono y un total de 50 ppm de compuestos de azufre.
- El subproducto del proceso es agua que debe ser eliminada, esto se realiza con el oxidante en el cátodo (aire u oxígeno). Para que esto suceda es necesario que el sistema opere a temperaturas cercanas a los 190 °C (a temperaturas superiores, se descompone el ácido fosfórico). Si funcionara a temperaturas menores, el agua se disolvería en el electrolito y no se podrá eliminar.

- No permiten tiempos rápidos de puesta en marcha, debido a que tienen que ser calentadas antes de entrar en operación. Además deben mantenerse continuamente en su temperatura de funcionamiento.
- Son grandes y pesadas.
- No pueden auto-reformar los hidrocarburos.

Las plantas de generación basadas en esta tecnología ofrecen eficiencias entre el 36% y el 42%.

3.3.3.- Pilas de combustible de con membrana de intercambio de protones.

Las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM, "Proton Exchange Membrane") se denominan así porque el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de una celda. El electrolito conduce los iones de hidrógeno (H^+) desde el ánodo hasta el cátodo y está compuesto por una película de polímero sólido que va situada entre los dos electrodos. La MEA ("Membrane Electrode Assembly") está formada por la película de polímero más los electrodos y su espesor es inferior a 1 mm. Esta membrana permite el paso a través de ella de los iones de hidrógeno, con la particularidad de ser impermeable al resto de sustancias, comportándose como un aislante electrónico. En la figura 3.7 se puede ver un esquema simplificado del funcionamiento de una pila con membrana de intercambio de protones. Las Pilas PEM pueden ser alimentadas por combustibles reformados y con aire.

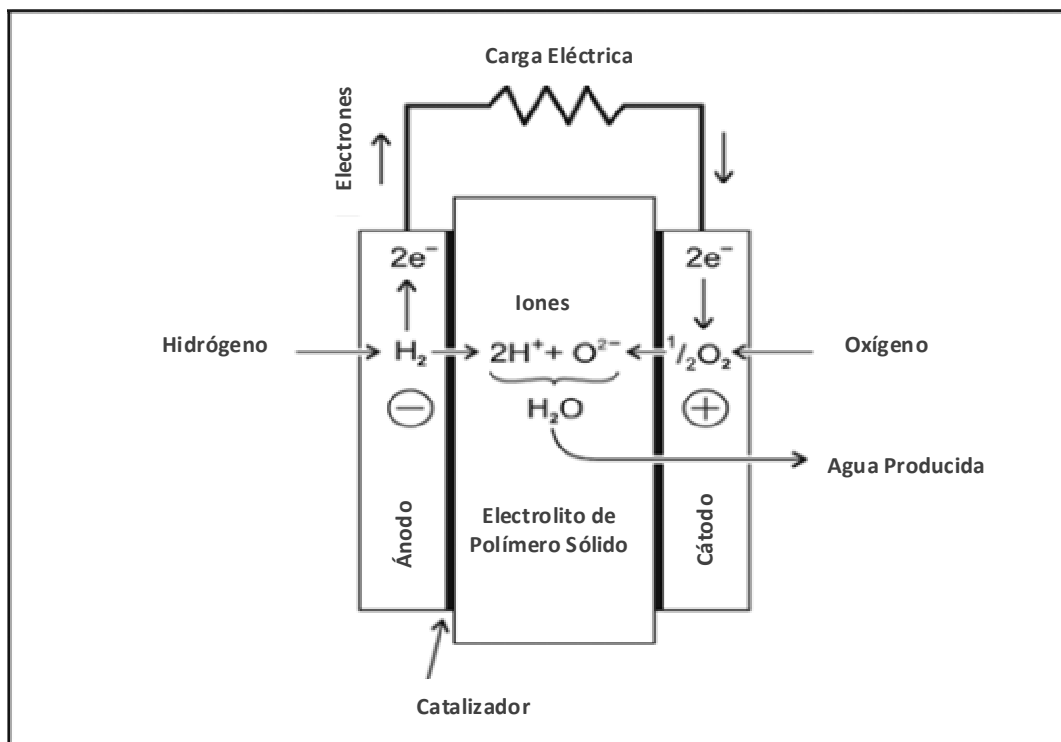


Figura 3.7.- Pila de Combustible PEM.

Este tipo de pila permite obtener a temperatura ambiente el 50% de la potencia de forma inmediata y la máxima potencia aproximadamente 3 minutos después de la puesta en marcha. Esto es debido a la temperatura de funcionamiento de este tipo de pila que se encuentra entre los 70 y 90 °C. Su presión de trabajo oscila entre 1 y 2 bar (15 a 30 psi). Y cada celda es capaz de producir alrededor de 1,1 VDC.

En las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones reaccionan hidrógeno con oxígeno. Los iones se conducen a través del electrolito desde el ánodo al cátodo por la atracción reactiva del oxígeno con el hidrógeno, mientras que los electrones son forzados a través de un circuito externo.

La reacción en el ánodo es: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$.

La reacción en el cátodo es: $\text{O}_2 + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

La reacción general de la celda es: $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

En la reacción general, la célula de combustible genera agua y calor, que deben ser evacuados a través del flujo de gases en el cátodo agua que se acumula en el cátodo y en el caso del calor, además por convección (natural o forzada) con el medio que rodea a la pila.

Este tipo de pilas presenta una serie de ventajas como son:

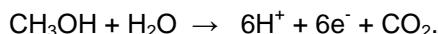
- Toleran el dióxido de carbono, lo que implica que pueden utilizar aire como oxidante, e hidrocarburos reformados como combustible.
- Utilizan un polímero sólido como electrolito, lo que elimina la corrosión y los problemas de reposición de electrolito así como los problemas asociados a la seguridad cuando se emplean electrolitos líquidos.
- Trabajan con temperaturas de funcionamiento bajas, lo que permite arranques instantáneos y no requiere aislamientos térmicos. Esto simplifica cuestiones relacionadas con los materiales y aumenta la seguridad.
- Operaran con agua pura, lo cual minimiza los problemas de corrosión y mejora la seguridad.
- Tienen alto voltaje, corriente y densidad de potencia.
- Operan a baja presión, lo que incrementa la seguridad.
- Tienen buena tolerancia a las presiones diferenciales de los gases reactivos.
- Son compactas y robustas.
- Tienen un diseño mecánico relativamente simple.
- Usan materiales de construcción estables.

Como desventajas:

- Pueden tolerar solamente sobre unos 50 ppm de monóxido de carbono. Cuando operan con hidrocarburos reformados, el CO producido en el proceso debe ser eliminado y convertido en CO₂ por un proceso de oxidación. Este proceso es simple desde el punto de vista de la catálisis y se puede integrar fácilmente en el sistema completo.
- Pueden tolerar sólo unos pocos ppm de compuestos de azufre.
- Necesidad de humidificación del gas reactivo. La humidificación es un añadido de energía y aumenta la complejidad del sistema. El uso de agua para humedecer los gases limita la temperatura de funcionamiento de la pila de combustible al menos al punto de ebullición del agua y por lo tanto disminuye el potencial de las aplicaciones de cogeneración.
- Emplean como catalizador platino, lo cual encarece el coste final de la pila.
- El coste de la membrana es elevado.

Dentro de las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones, existe una variante denominada pilas de Combustible PEM de metanol directo. Esta tecnología está aún en vías de desarrollo, pero es especialmente interesante para las aplicaciones de micro-potencias.

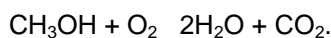
Estas pilas emplean metanol como combustible, en lugar de hidrógeno. En este tipo de pilas, la energía liberada durante la reacción es menor que cuando se utiliza hidrógeno puro, pero requieren un sistema de almacenamiento de combustible mucho más simple y además no tiene la necesidad de producir hidrógeno. En una pila de combustible PEM de metanol directo, las celdas se alimentan en el ánodo con una mezcla líquida de metanol y agua y en el cátodo con aire. A 130 °C, un catalizador inmediatamente descompone el metanol de acuerdo con la siguiente reacción:



El oxígeno del aire, se ioniza y, reacciona con el hidrógeno para formar agua:



Combinando las reacciones del ánodo y el cátodo, la reacción general de la celda tiene como productos agua pura y dióxido de carbono:



3.3.4.- Pilas de combustible de carbonato fundido.

La Pila de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC, del inglés "Molten Carbonate Fuel Cell") ha evolucionado, desde los trabajos realizados a principios del año 1960, en los que se trataban de encontrar una Pila de Combustible que trabajase directamente con carbón como combustible. A fecha de hoy se ha demostrado que el funcionamiento directo con carbón no es viable.

Este tipo de pilas utilizan una sal de carbonato fundido como electrolito, el cual permite que los iones carbonato (CO_3^{2-}) sean conducidos desde el cátodo al ánodo. Es lo contrario a muchos otros tipos de pilas de combustible, que conducen iones de hidrógeno desde el ánodo al cátodo. El electrolito esta compuesto de una mezcla fundida de litio y carbonatos de potasio. Esta mezcla es retenida por fuerzas capilares dentro de una matriz (porosa e inerte) de soporte cerámico de aluminato de litio.

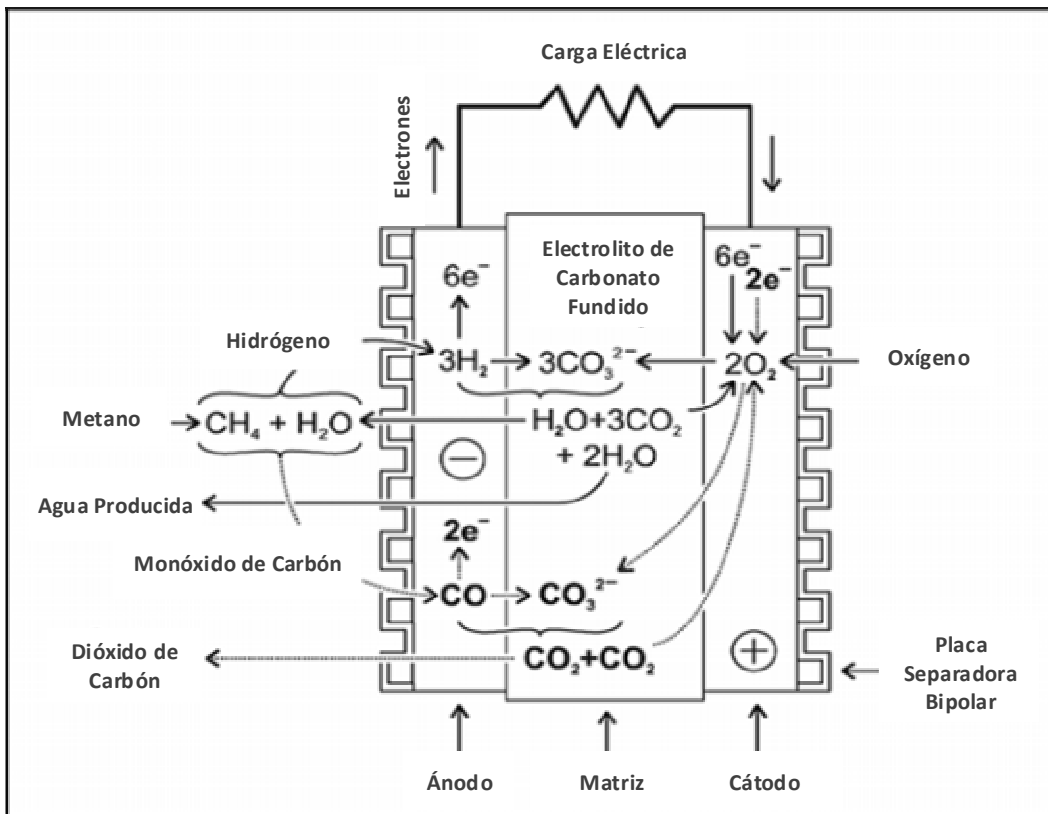
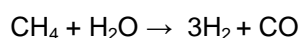


Figura 3.8.- Pila de Combustible de Carbonato Fundido.

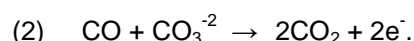
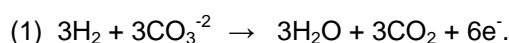
Las pilas de combustible de carbonato fundido funcionan a unos $650\text{ }^\circ\text{C}$ y una presión entre de 1 y 10 bar (de 15 a 150 psi). Cada celda puede producir entre 0,7 y 1,0 VDC. A esta temperatura, la estructura del electrolito se comporta como una pasta espesa, proporcionando un sellado de gas en los bordes de la celda.

Las pilas de combustible de carbonato fundido pueden funcionar con hidrógeno puro o con los combustibles de hidrocarburos ligeros. Cuando un hidrocarburo, como el metano, se introduce en el ánodo en presencia de agua, absorbe el calor y se somete a un reformado con vapor:



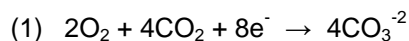
Al utilizar otros combustibles de hidrocarburos ligeros, el número de moléculas de hidrógeno y monóxido de carbono pueden cambiar, pero en principio, los productos resultantes son los mismos.

Las reacciones en el ánodo son:



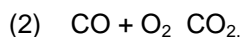
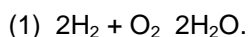
La primera de las reacciones (1) es la reacción de hidrógeno y se produce independientemente del combustible. La segunda reacción es la (2), la del monóxido de carbono y se produce sólo cuando se utiliza un hidrocarburo como combustible.

La reacción en el cátodo es:



Esta es la reacción del oxígeno y se produce independientemente del combustible. El ión CO_3^{-2} es conducido a través del electrolito desde el cátodo al ánodo por la atracción reactiva del hidrógeno y del monóxido de carbono con el oxígeno, mientras que los electrones se ven obligados a través de un circuito externo desde el ánodo al cátodo.

Las reacciones generales de la pila combinando las reacciones del ánodo y del cátodo son:



La primera de las reacciones (1) es la reacción de hidrógeno y se produce independientemente del combustible. La segunda reacción es la (2), la del monóxido de carbono y se produce sólo cuando se utiliza un hidrocarburo como combustible.

De este modo, la pila de combustible produce agua, con independencia del combustible y dióxido de carbono, si se utiliza un hidrocarburo como combustible. Ambos productos, agua y

dióxido de carbono, deben ser continuamente eliminados del cátodo para facilitar la reacción posterior.

Este tipo de pilas presenta una serie de ventajas como son:

- Permiten el reformado espontáneo interno de combustibles de hidrocarburos ligeros.
- Generan una gran cantidad de energía térmica residual en el proceso, pudiendo aprovecharse esta para mover una turbina de gas y/o producir un vapor de alta presión que pueda ser utilizado en una turbina de vapor o para cogeneración de calor y potencia
- Tienen una cinética de reacción rápida.
- En contraste con las pilas de combustible de baja temperatura, las MCFC no tienen dificultades con el CO₂ y el CO presentes en el combustible.
- Tienen alta eficiencia.
- No precisan catalizadores de metal noble.

Como desventajas:

- Requieren el desarrollo de materiales adecuados que presenten estabilidad dimensional, resistan la alta temperatura de trabajo junto con la acción corrosiva y se presten a la fabricación. Normalmente, se emplean aceros inoxidable especiales basados en Ni, Co, Fe o Cr/Al, los cuales cumplen con los requerimientos anteriores. La corrosión es un problema particular y puede causar que el óxido de níquel del cátodo se disuelva en el electrolito, la pérdida del electrolito, el deterioro de las placas separadoras, y la deshidratación o la inundación de los electrodos. Todos estos efectos de la corrosión implican una disminución en el rendimiento, de la vida límite de la pila, pudiendo culminar en un fallo de la pila. El uso de platino como catalizador supera algunos de estos problemas, pero elimina el ahorro como importante ventaja. La inestabilidad dimensional puede causar la deformación de los electrodos que altera la superficie activa y puede causar la pérdida de contacto y altas resistencias entre los componentes.
- Presentan baja tolerancia a los sulfuros del catalizador del reformador. El ánodo, en particular, no tolera más de 5,1 ppm de compuestos azufrados (principalmente H₂S y COS) en el gas de combustible sin sufrir una pérdida de rendimiento significativa. Todos los combustibles fósiles contienen algo de azufre, y debido a las relativamente bajas temperaturas de reformado éste puede envenenar el catalizador.
- Tienen un electrolito líquido, lo que introduce problemas debido al manejo de líquidos.
- Requieren un considerable período de calentamiento.

3.3.5.- Pilas de combustible de óxido sólido.

Las pilas de combustible de óxido sólido usan un electrolito cerámico sólido que conduce los iones de óxido (O^{2-}) del cátodo al ánodo. Este electrolito está compuesto de un óxido sólido, por lo general zirconia estabilizada con ytrio que se muestra como un excelente conductor de los iones de oxígeno.

Estas pilas tienen un proceso de fabricación como el de los chips de los ordenadores mediante deposición secuencial de varias capas de material. Las configuraciones comunes incluyen diseños tubulares y planos. Los diseños difieren en la magnitud de las pérdidas disipadas dentro de las pilas, en el modo del sellado de los canales entre el combustible y el oxidante, y en la forma en que se conectan las celdas para construir un stack de éstas, que es el corazón de la pila. Los metales como el níquel y el cobalto se pueden utilizar como materiales de electrodo.

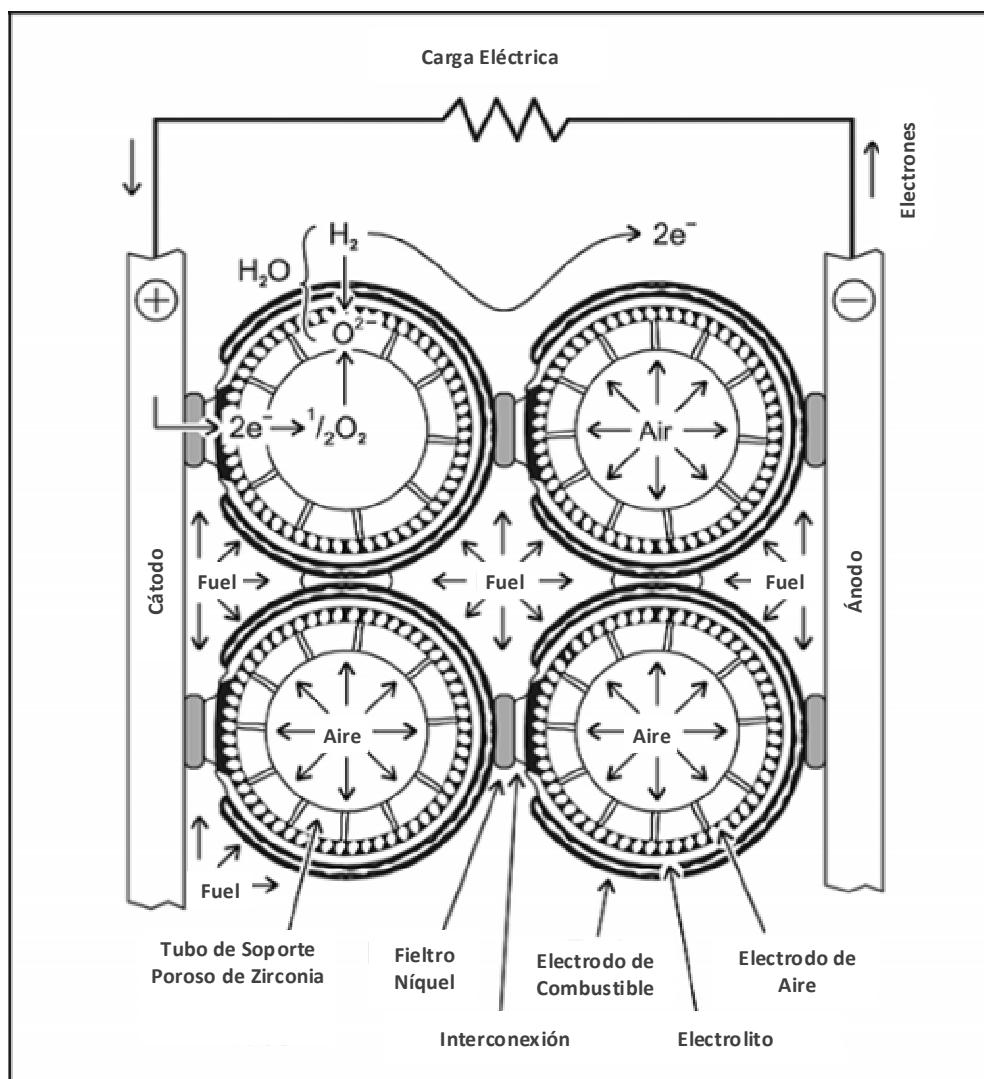
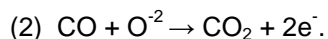
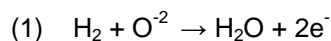


Figura 3.9.- Pila de Combustible de Óxido Sólido (Diseño Tubular).

Las pilas de combustible de óxido sólido, al igual que las de carbonato fundido pueden funcionar con hidrógeno puro o con hidrocarburos. Esto da como resultado un flujo de entrada del combustible compuesto de hidrógeno con o sin monóxido de carbono.

Las reacciones en el ánodo son:

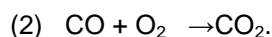
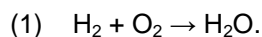


La primera de las reacciones (1) es la reacción de hidrógeno y se produce independientemente del combustible. La segunda reacción es la (2), la del monóxido de carbono y se produce sólo cuando se utiliza un hidrocarburo como combustible.

La reacción en el cátodo es: $\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

Esta es la reacción de oxígeno y se produce también independientemente del combustible. Los iones de oxígeno, O^{2-} , se conducen a través del electrolito desde el cátodo al ánodo por la atracción reactiva del hidrógeno y del monóxido de carbono por el oxígeno, mientras que los electrones se ven obligados a circular a través de un circuito externo desde el ánodo al cátodo. Por tanto, los productos de reacción se acumulan en el ánodo.

Las reacciones generales de la celda son:



La primera de las reacciones (1) es la reacción de hidrógeno y se produce independientemente del combustible. La segunda reacción es la (2), la del monóxido de carbono y se produce sólo cuando se utiliza un hidrocarburo como combustible.

Tanto el agua producida por la pila como el dióxido de carbono (si se emplea un combustible de hidrocarburos) deben ser continuamente eliminados del cátodo para facilitar la reacción posterior.

Las pilas de combustible de óxido sólido trabajan entre 800 y 1000°C y a una presión de 1 bar (15 psi). Cada celda puede producir aproximadamente entre 0.8 y 1.1 VDC.

Este tipo de pilas presenta una serie de ventajas como son:

- Permiten el reformado interno de hidrocarburos combustibles. Dado que los iones de óxido, en lugar de iones de hidrógeno, viajan a través del electrolito, las pilas de

combustible pueden, en principio, ser utilizadas para oxidar cualquier combustible gaseoso.

- Son más tolerantes a los compuestos de azufre que las pilas de combustible de carbonatos fundidos, pero aún así los niveles generales deben ser limitados a 50 ppm. Esta mayor tolerancia de azufre hace que estas celdas de combustible sean atractivas para los combustibles pesados, aunque el exceso de azufre en el combustible disminuye su rendimiento.
- Pueden funcionar igualmente con combustibles secos o húmedos.
- Generan un alto grado de calor residual que puede emplearse para cogeneración.
- Presentan una alta eficiencia. Hoy en día, con gases a presión ambiente han demostrado eficiencias cercanas al 45%, aunque hay laboratorios que publican eficiencias cercanas al 60% con los gases de entrada presurizados.
- Pueden operar a más altas densidades de corriente que las pilas de combustible de carbonato fundido.
- El electrolito es sólido, lo que evita todos los problemas asociados con el manejo de líquidos.
- Se pueden fabricar con una variedad de formas de auto-apoyo y configuraciones.
- No necesitan catalizadores de metal noble, lo cual reduce su precio.

Como desventajas:

- El tiempo de arranque es bastante grande debido a la temperatura de operación, y las prestaciones de las celdas son muy sensibles a las variaciones de esta temperatura.
- Las altas temperaturas que se alcanzan obligan a la utilización de aislantes térmicos sofisticados para proteger al personal y mantener el calor.
- Existen pocos materiales que puedan funcionar a altas temperaturas y continuar en estado sólido durante largos períodos de tiempo. Los materiales empleados, deben tener la conductividad requerida, mantenerse sólidos a altas temperaturas, ser químicamente compatibles con otros componentes de la celda y tener una alta resistencia. Además, los materiales seleccionados deberán ser densos para evitar la mezcla del combustible y los gases oxidantes, y deben tener muy parecidas sus características de expansión para evitar las grietas durante los ciclos térmicos.

Este tipo de Pilas de Combustible son ideales para aplicaciones estacionarias, pero no son recomendables para el sector del transporte o dispositivos portátiles.

Capítulo 4: La Pila de combustible PEM.

Las pilas de combustible de membrana polimérica (PEM), se encuentran formadas por un conjunto de celdas individuales agrupadas en serie, que dan lugar según el número y el tamaño de estas, a pilas de combustible con diferente capacidad y tamaño.

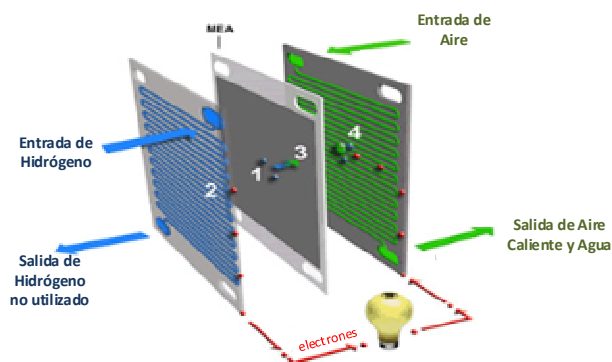


Figura 4.1.- Esquema de funcionamiento del stack de una pila de combustible PEM.

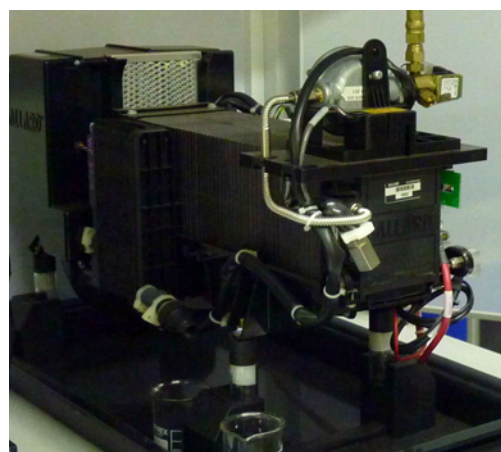


Figura 4.2.- Pila de combustible PEM del fabricante Ballard.

Cada celda individualmente puede aportar una tensión máxima de salida de 1.2 VDC, con una eficiencia entre el 40 y el 50%, calculada como una proporción entre el voltaje teórico y el producido por la celda. Sin embargo, la eficiencia del sistema completo de pila de combustible PEM esta entorno al 40%, ya que comprende además del stack, una serie de equipos auxiliares que controlan y regulan la operación de la pila, entre los que destacan el sistema de refrigeración del stack, de humidificación, acondicionamiento de la corriente eléctrica, sistema de monitoreo y control, suministro de aire, etc. que introducen pérdidas y reducen la eficiencia total del sistema. Aún así, la eficiencia de la pila PEM es superior a la eficiencia global de un motor de combustión interna que se sitúa en el 25%.

4.1.- LA CELDA DE COMBUSTIBLE.

Una celda individual de combustible, físicamente consiste en una membrana de electrodos (MEA, Membrane Electrode Assembly), que está formada por el ánodo, el cátodo, el electrolito y el catalizador, situada entre dos placas de flujo de grafito, que conducen el combustible y el aire maximizando el contacto con la membrana MEA. Estas placas son de un material conductor que permite que la corriente eléctrica generada en la reacción electroquímica pase de una a otra celda hasta llegar a la placa final, donde es extraída. Además de esto, encontramos situado en los lados opuestos de la membrana MEA las placas del canal de combustible y aire.

En los extremos de la serie de las placas de flujo, van colocados los terminales eléctricos. Estas placas terminales están conectadas a los terminales por donde la potencia de salida es extraída. La secuencia completa de placas, se mantiene unida por una serie de empaque de varillas u otros medios mecánicos.

Para regular la temperatura de la reacción de la pila de combustible se emplea el refrigerante. Las placas de refrigeración se colocan entre cada celda de combustible de manera que los canales de estas placas de refrigeración suministran el refrigerante a la pila para absorber el calor según las necesidades. Los sellos entre las placas de grafito garantizan que las corrientes del oxidante, el combustible y el refrigerante nunca se mezclen dentro de las celdas de combustible.

El objetivo principal durante el diseño de las celdas de combustible es obtener una gran potencia de salida por área de la membrana, ampliando el área de la membrana activa a un tamaño útil, haciendo que el stack de la pila se compacte de manera adecuada para su uso previsto. No obstante, tampoco podemos dejar de lado aspectos como la fiabilidad, duración y costes de producción. Los puntos más críticos en el diseño de las celdas son los sellos, las tolerancias de los flujos, y la alineación de estas.

La membrana (MEA, Membrane Electrode Assembly).

La MEA es una membrana de polímero que actúa como electrolito sólido intercalado entre dos electrodos de carbono poroso. Entre la membrana y los electrodos va integrado un catalizador de platino. El conjunto de ensamblaje de electrodos a menudo incluye sellos integrales donde se ponen en contacto los componentes adyacentes.

Los electrodos proporcionan la interfaz entre los gases reactivos y el electrolito. Estos deben cumplir una serie de características, entre las que se encuentran:

- Ser permeables al gas húmedo.
- Ser conductores de los electrones libres que fluyen del ánodo al cátodo.
- Proporcionar la superficie de reacción donde se ponen en contacto con el electrolito.
- Estar contruidos con materiales compatibles.

El material del electrodo es muy delgado para maximizar el transporte de gas y agua. El papel de fibra de carbono se suele utilizar para este objetivo, ya que es poroso, hidrofóbico (no mojable), conductor y no corrosivo.

Para aumentar la velocidad a la que ocurre la reacción química se suele añadir un catalizador a la superficie de cada electrodo en la que hay contacto con el electrolito. Este catalizador activa la reacción química, pero no es consumido durante el proceso. Se emplea normalmente el platino como catalizador debido a su alta actividad electro-catalítica, buena estabilidad y alta conductividad eléctrica. Como inconveniente, presenta el elevado coste de adquisición, por lo que la cantidad utilizada (conocida como la carga de catalizador) se trata de reducir al máximo, manteniendo un buen rendimiento de la pila.

El electrolito.

El electrolito de polímero sólido es una membrana delgada con espesor entre 50 y 175 micras. Estas membranas están compuestas de ácidos perfluorosulfúricos, que son polímeros fluorocarbonados que tienen cadenas laterales que terminan en grupos de ácido sulfúrico ($-\text{SO}_3^{-2}$).

Las pilas de combustible PEM, al igual que las pilas de combustible de ácido fosfórico emplean un electrolito ácido. Todos los electrolitos ácidos de polímeros sólidos requieren la presencia de moléculas de agua para la conductividad de iones de hidrógeno durante la reacción de intercambio iónico. Para que la conductividad sea efectiva, la proporción es aproximadamente de tres moléculas de agua por cada ión de hidrógeno. Por tanto, para que la pila de combustible opere de un modo eficaz, los gases en contacto con la membrana deben estar saturados de agua.

El polímero, presenta a nivel molecular una estructura tubular. La parte externa de los tubos son materiales fluorados hidrofóbicos y en la superficie interna de los tubos, se encuentran los grupos de ácido sulfúrico, que ofrecen la hidrofilia (conductos fácilmente mojables) para la conducción. Las estructuras tubulares se contraen y reordenan de modo que el contenido de agua disminuye. A medida que estos tubos se contraen durante la deshidratación, la conductividad cae de forma abrupta resultando una mayor resistencia de contacto entre la membrana y el electrodo, pudiendo dar lugar a la aparición de grietas o agujeros en la membrana.

La empresa Ballard Power Systems, ha desarrollado para sus celdas sus propias membranas, pero existen empresas como Dupont o la Dow Chemical Company, que fabrica membranas comerciales. El objetivo de todas ellas, es producir membranas que presenten una resistencia mecánica razonable, alta estabilidad dimensional (resistencia a la inflamación), alta conductividad iónica, bajo peso equivalente y que sean fácilmente manufacturables. Además de lo anterior, todos los electrolitos deben realizar las funciones fundamentales como conductor de protones, aislante de electrones y separador de gas.

Placas de Flujo.

Las placas de flujo (Figura 4.3), están típicamente fabricadas de grafito, ya que este material presenta una excelente conductividad, baja contaminación y relativo bajo costo. Las placas de flujo tanto de combustible como de oxidante se encuentran a ambos lados de la membrana polimérica, y en ellas se encuentran mecanizados los canales de flujo. La forma específica de estos canales de gas, es fundamental para conseguir una generación uniforme de energía, un rendimiento estable de las celdas y una correcta gestión del agua producida. Además, para que la corriente liberada durante la reacción electroquímica pueda derivarse de una celda a otra, y finalmente a las placas terminales eléctricas, cada placa debe ser conductora de la electricidad.

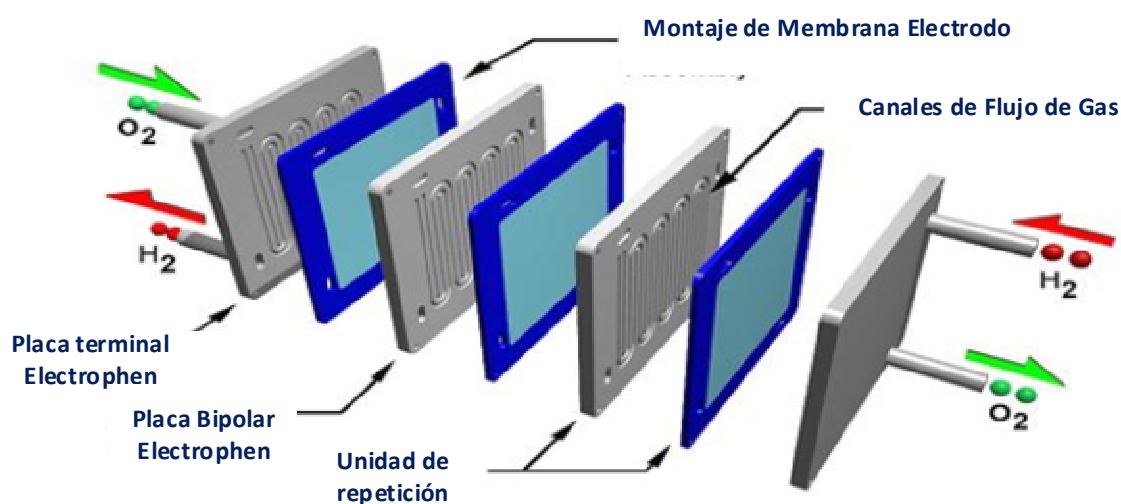


Figura 4.3.- Ensamblaje del stack de una pila de combustible PEM.

Para la refrigeración, se sitúan entre cada celda de combustible las placas de refrigeración. Su diseño y construcción es similar al de las placas de flujo de gas. El objetivo durante el diseño de estos canales de flujo de refrigerante es una gestión eficaz del calor.

Tanto las placas de flujo como las de refrigerante, incorporan puertos de gas y agua que se utilizan para distribuir uniformemente el combustible, el oxidante y el refrigerante que entran y salen de la pila. Para evitar que se mezclen estos flujos de caudal, se montan entre las placas de grafito los sellos.

Humidificadores.

Para que se pueda producir la conducción de iones y evitar daños en las celdas, debe existir una adecuada humidificación. La cantidad de agua que puede absorber un gas es

altamente dependiente de la temperatura de la humidificación, particularmente a baja presión. En concreto, un gas frío puede contener menos cantidad de agua que uno más caliente.

El objetivo de la humidificación es saturar con tanta agua como sea posible los gases reactivos. Estos gases deben ser humidificados a la temperatura de funcionamiento de la celda o próxima a esta, ya que si realizamos la humidificación a una temperatura por encima de la de funcionamiento de la celda se condensaría algo de agua en el paso del gas una vez reducida la temperatura a la de funcionamiento de la celda. Por el contrario, si la humidificación es a una temperatura menor a la de funcionamiento de la celda, el gas no estaría saturado una vez alcanzada la temperatura de funcionamiento.

Los humidificadores, pueden encontrarse integrados en el stack de la pila o separados como componentes externos. Estos últimos, pueden ser a su vez de membrana o de diseño de contacto.

- *Humidificadores integrados en el stack de la pila:* Están formados por una serie de placas adicionales de grafito armadas en la pila de combustible. Esto da lugar a una sección activa de la pila, que contiene las celdas de combustible, y una sección inactiva, que contiene las placas humidificadoras. Las placas humidificadoras son similares a las placas de flujo, y se utilizan para canalizar el gas y el agua a ambos lados de una membrana hidrófila. El agua migra a través de la membrana y satura al gas adyacente. Se comercializan diferentes tipos de esta membrana para este propósito.
- *Humidificadores de membrana.* Operan externos al stack de la pila y su forma de operar es la misma que los humidificadores integrados en el stack de la pila.
- *Humidificadores de contacto.* Estos operan rociando agua sobre una superficie de humidificación en caliente o en una cámara de gran superficie a través de la cual fluye uno de los gases reactivos. De este modo, se consigue que el agua se evapore directamente, haciendo que el gas se sature.

Los humidificadores externos obtienen el agua mediante el empleo de un circuito de humidificación de agua separada o también del flujo del refrigerante de la pila. En este último caso, las ventajas y desventajas son las mismas que cuando se emplea un humidificador integrado en el stack. La principal ventaja de utilizar un circuito de humidificación de agua separada, es poder utilizar un refrigerante para el stack con mejores características que el agua en relación a las bajas temperaturas, pero presenta el inconveniente de la complejidad de los procesos para alcanzar la misma temperatura en el humidificador y en el stack. El empleo de humidificadores externos de

membrana o de contacto, resulta en componentes individuales que son menos voluminosos y potencialmente más robustos.

4.2.- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA PILA DE COMBUSTIBLE PEM.

4.2.1.- Curva de Polarización.

El voltaje teórico óptimo de la celda de combustible es de 1,2 V, pero no se lleva a cabo con todas las corrientes de operación, sino que las pilas de combustible alcanzan su más alto voltaje de salida en circuito abierto y sin carga, de manera que con el aumento del consumo de corriente se produce una caída de la tensión. A esto se le denomina fenómeno de polarización y se representa mediante una curva, denominada curva de polarización. Por otra parte, la variación de la corriente depende del tamaño de la carga eléctrica colocada a través de la pila de combustible.

La curva de polarización caracteriza el voltaje de la celda en función de la corriente y muestra la eficiencia electroquímica de la pila de combustible para cualquier corriente de operación, ya que la eficiencia es la relación entre el voltaje real de la celda y el voltaje teórico máximo.

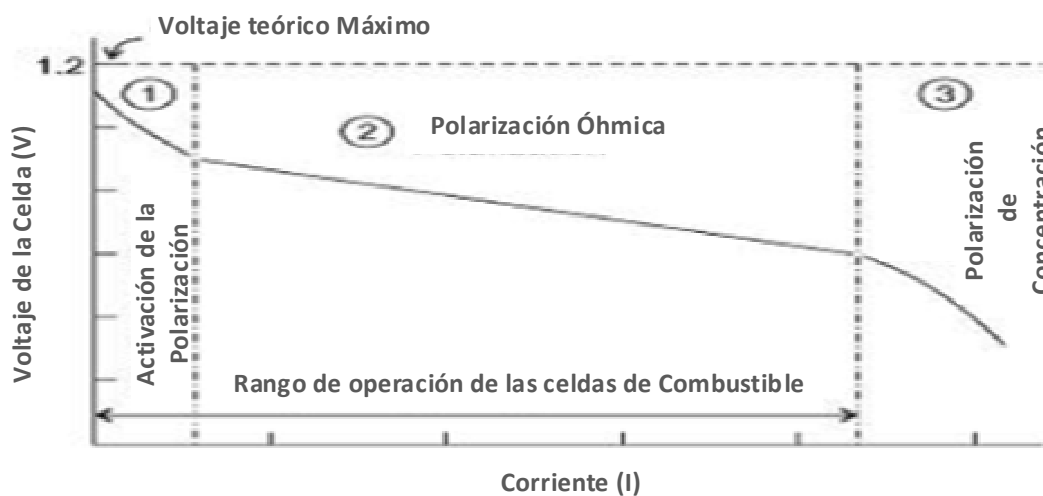


Figura 4.4.- Curva de polarización de una pila de combustible.

Las pilas de combustible, presentan curvas de polarización muy similares a las de las baterías, con un excelente rendimiento a carga parcial. Esto es debido a que la tensión aumenta cuando la carga disminuye. Por el contrario, los motores de combustión interna muestran una rápida disminución de la eficiencia a carga parcial, funcionando de manera más eficiente a plena carga.

La polarización es causada por factores químicos y físicos asociados con diversos elementos de la pila de combustible. Estos factores limitan los procesos de la reacción cuando la

corriente está fluyendo. La desviación del potencial de la pila del comportamiento ideal es un resultado directo de la suma de estos factores, sobre todo, el rango de la carga. En la curva de polarización total se distinguen tres zonas (figura 4.4):

Zona 1: “Activación de la polarización”. Está relacionada con la barrera de energía que hay que superar para iniciar una reacción química entre reactivos. A baja corriente, la transferencia de electrones es lenta y una parte de la tensión del electrodo se pierde con el fin de compensar la falta de actividad electro-catalítica.

Zona 2: “Polarización óhmica o resistencia de polarización”. Se produce debido a las pérdidas resistivas en la celda. Estas pérdidas resistivas se producen en el electrolito (iónicas), en los electrodos (electrónicas e iónicas), y en las conexiones de los terminales en la celda (electrónica). Dado que el stack de la pila y el electrolito obedecen a la ley de Ohm ($V = IR$), la cantidad de voltaje perdido para forzar la conducción varía linealmente a lo largo de esta región.

Zona 3: “Polarización de concentración”. Se produce cuando las reacciones del electrodo se ven obstaculizadas por los efectos de la transferencia de masa. En esta zona, los reactivos se consumen en mayor proporción de la que pueden ser suministrados mientras el producto se acumula en mayor proporción de lo que puede ser retirado. Como consecuencia, el voltaje de la célula se reduce a cero, ya que estos efectos inhiben la reacción.

4.2.2.- Curva de Potencia.

La curva de potencia (figura 4.5), caracteriza la potencia eléctrica de la pila en función del voltaje. Los valores de potencia eléctrica de la pila, los podemos obtener a través de la curva de polarización, ya que esta relaciona los valores de la tensión y de la corriente en todas las condiciones de operación.

Como se puede observar en la curva de la figura 4.5, la potencia máxima se produce aproximadamente entre 0,5 y 0,6 V, que corresponde relativamente a una elevada corriente. En el punto máximo, la resistencia interna de la celda es igual a la resistencia eléctrica del circuito externo. Sin embargo, puesto que la eficiencia cae al aumentar el voltaje, hay un equilibrio entre alta potencia y alta eficiencia. No se debe operar en el rango de tensiones donde la curva de potencia cae más bruscamente.

Cuando se diseñan las celdas de combustible, se debe seleccionar el rango de operación deseada en función de si se busca mejorar la eficiencia o la potencia para una aplicación dada.

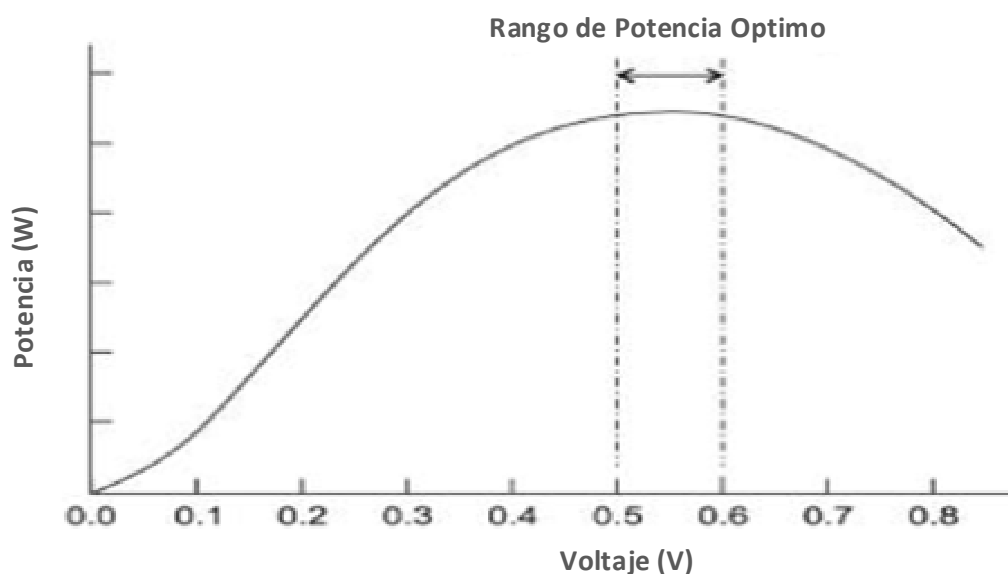


Figura 4.5.- Curva de potencia de una pila de combustible.

4.2.3.- Factores que afectan a la curva de polarización.

La forma de la curva de polarización de las celdas de combustible depende de la temperatura, la humedad y de la presión de operación. Del mismo modo, también varía con el incremento o disminución del valor estequiométrico del gas reactivo. Al variar estos parámetros, siempre se va a tratar de subir la curva de polarización, para poder obtener mayor eficiencia electroquímica y una mayor potencia. En las figura 4.6, se puede ver representado el aumento y disminución de una curva de polarización.

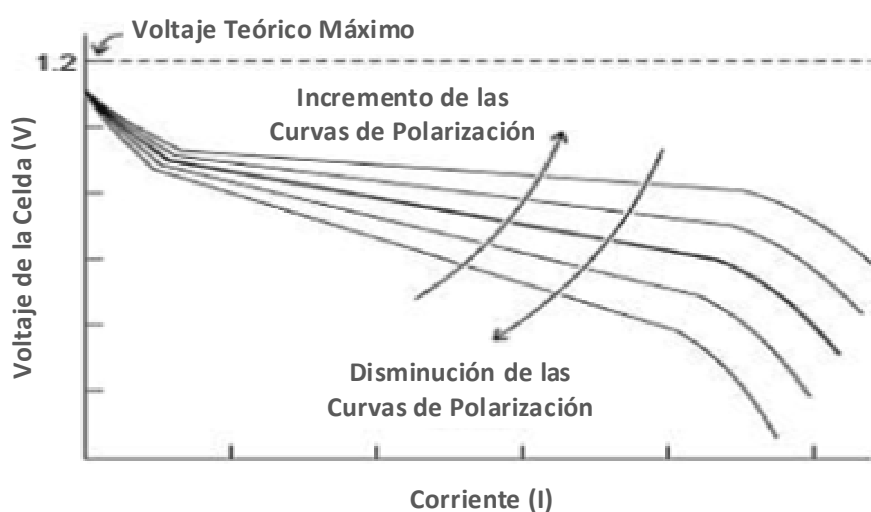


Figura 4.6.- Variación de una curva de polarización.

- **Efectos temperatura.**

El aumento de la temperatura de funcionamiento de las celdas de combustible, es beneficioso para la curva de polarización, ya que produce el aumento de esta. Por el contrario, la disminución de la temperatura de funcionamiento, hace que disminuya la curva de polarización. Esto se debe a la mejora de la transferencia de masa dentro de las celdas a altas temperaturas, lo que provoca una disminución neta de la resistencia en la celda.

No obstante, estamos limitados a la hora de aumentar la temperatura de funcionamiento de las celdas a un valor máximo de 100°C, debido a la corriente de agua como producto dentro de la corriente oxidante. Si el agua hierve, el vapor resultante reduce la presión parcial del oxígeno, dando lugar a una disminución del rendimiento de las celdas (falta de oxígeno) y en los peores casos, podrían llegar a dañarse las celdas, reduciendo su vida útil de operación. La tensión de la celda aumenta con la temperatura hasta que la temperatura se acerca al punto de ebullición del agua, momento en el cual la tensión comienza a disminuir.

La temperatura óptima de funcionamiento está en torno a 80 °C y por lo general, las temperaturas de operación están entre 70 y 90° C. No debemos olvidar, que trabajar a elevadas temperaturas afecta a todos los componentes del sistema, algunos de los cuales deben ser rediseñados para soportar estas nuevas condiciones, con lo que esto supone en costes.

- **Efectos de la Presión.**

Al igual que ocurre con la temperatura, el aumento de la presión de funcionamiento de las celdas de combustible, produce el aumento de la curva de polarización, ya que produce el aumento de esta. Por el contrario, la disminución de la presión de funcionamiento, hace que disminuya la curva de polarización. Esto es debido a que la velocidad de la reacción química es proporcional a las presiones parciales del hidrógeno y el oxígeno. Por lo tanto, el efecto del aumento de la presión es más prominente cuando se utiliza un oxidante diluido (como el aire) o un combustible diluido (como un reformado).

Al aumentar las presiones, estamos ayudando a forzar al hidrógeno y al oxígeno a entrar en contacto con el electrolito, promoviendo la reacción electroquímica. Además, a altas corrientes, se produce una mayor sensibilidad al aumento de la presión.

El operar a presiones más elevadas, también nos permite alcanzar temperaturas más altas, ya que esto aumentaría la temperatura del punto de ebullición del agua. Como vimos anteriormente, el aumento de la temperatura es beneficioso para la curva de polarización, sin embargo, este efecto es leve a las presiones puestas en práctica en el funcionamiento de las pilas PEM. No obstante, este aumento de la presión también va a generar ciertos problemas.

Al trabajar a presiones más elevadas, las juntas de las pilas de combustible operan bajo tensiones adicionales y la compresión de aire adicional que se requiere absorbe mucho de la potencia total. Además, el flujo entre celdas del "stack" de la pila de combustible trabaja mejor a baja presión ya que exhiben un menor flujo inducido de pérdidas de presión. Otra consecuencia de trabajar a mayor presión es el aumento de tamaño y por tanto del coste de algunos componentes del sistema que deben ser re-diseñados para soportar estas nuevas condiciones de trabajo.

Las pilas de combustible PEM suelen funcionar a una presión no mayor a unas pocas atmósferas (2-4 bar), debido a que el aumento de la presión conlleva rendimientos decrecientes al considerar tanto la eficacia del "stack" como las consecuencias globales del sistema.

- **Efectos de la Humedad.**

El uso de agua para la humidificación también limita la temperatura de operación y almacenamiento de la pila de combustible entre 0 y 100 °C, ya que por debajo o por encima de estos límites, el agua se congela o se evapora respectivamente.

En el funcionamiento de las pilas de combustible PEM, las moléculas de agua se mueven con las de hidrógeno durante la reacción de intercambio iónico, por tanto sino mantenemos una humidificación suficiente del flujo de gas con agua, la membrana se deshidrata y esto puede conducir a grietas o agujeros en la misma, pudiendo generar puntos calientes, un cortocircuito químico, o incluso un incendio. No obstante, esta hidratación debe realizarse en la justa medida, ya que un exceso de humidificación provoca la condensación e inundaciones de agua en las placas de circulación, pudiendo dar lugar a un fenómeno conocido como inversión de la pila donde las celdas afectadas producen un voltaje negativo o cero. Si una gran tensión negativa se produce lo suficiente, las celdas de combustible afectadas comienzan a actuar como un electrolizador. Esto produce una gran cantidad de calor y puede destruir la celda. Para prevenir esto, los sistemas de monitorización que normalmente están instalados en las pilas detectan la inversión de la pila evitando posibles daños.

Las pilas de combustible operan normalmente en o cerca de las condiciones de saturación a la temperatura de funcionamiento. Esto proporciona la máxima cantidad de agua posible evitando las inundaciones. La humedad está generalmente medida como "humedad relativa", ya que depende de la presión y la temperatura del gas. Cuando un gas ha absorbido tanta agua como físicamente le sea posible a una presión y temperatura dadas, se dice que está saturado y tiene una humedad relativa del 100%. Si ese gas saturado a continuación, se calienta (sin la adición de más agua), la humedad relativa disminuye (cada grado centígrado aumentado, baja la humedad relativa en aproximadamente un 4%). Si el gas se enfría, parte del agua se condensa y el gas permanece saturado a la nueva temperatura.

Es también de suma importancia, el tener en cuenta que el agua empleada en el humidificador no debe ser conductora, ya que sino, provocaría cortocircuitos y corrientes de corrosión dentro de la pila de combustible. El agua al absorber los iones de su entorno, llega a ser conductora, por tanto debemos obligarla a fluir continuamente a través de un filtro de desionización para eliminar estos iones.

- **Efectos Estequiométricos.**

Por estequiometría se entiende la relación entre la cantidad de gas presente en relación a la cantidad de este gas necesaria exactamente para completar la reacción. Por lo tanto, una relación estequiométrica de 1,0 proporciona exactamente el número correcto de las moléculas de gas que teóricamente completan la reacción. De modo que estequiometrias superiores a 1,0 proporcionar un exceso de gas y ratios inferiores a 1,0 proporcionan insuficiencia de gas.

Al emplear un gas reactivo con mayor valor estequiométrico, se aumenta la posibilidad de que un número suficiente de moléculas, de hidrógeno y oxígeno, interactúen con el electrolito. Por lo tanto, al emplear un gas con mayor valor estequiométrico, se aumentan las curvas de polarización de las celdas de combustible y por el contrario al emplear un gas reactivo de menor valor estequiométrico, estaremos disminuyendo las curvas de polarización. Si no se emplean gases reactivos con suficiente estequiometría se pueden causar daños permanentes, debido a que se está privando al stack de la pila de suficientes reactivos.

En la práctica las pilas de combustible operan con hidrógeno con un ratio estequiométrico de 1,4, y con una relación estequiométrica de aire de 2,0 con respecto a la carga nominal. El gas adicional aporta un beneficio pequeño. Cuando se opera a bajas potencias es cuando se requiere una mayor ratio estequiométrico.

4.3.- EFICIENCIA DE LA PILA DE COMBUSTIBLE PEM.

Como ya se mencionó anteriormente, la eficiencia de la pila de combustible es superior a la de otros sistemas de generación de energía, como puede ser un motor de combustión interna. No obstante es importante realizar la diferenciación entre la eficiencia de la pila de combustible, del stack de las celdas, y de todo el sistema global, ya que la eficacia de este último es inferior a la de la propia pila y esta a su vez menor a la del stack de celdas.

El stack de la pila de combustible, es la unidad de conversión de potencia para un sistema de pila de combustible. Sin embargo, una instalación completa de pila de combustible está formada por una variedad de subsistemas necesarios para el control y la regulación de la operación de la pila. Entre estos subsistemas auxiliares se encuentran la refrigeración del stack, el suministro de reactivos y humidificación, acondicionamiento de la energía eléctrica, el

almacenamiento del combustible y en algunos casos del oxidante, así como el control y monitorización del proceso.

4.3.1.- Eficiencia del stack de la pila de combustible.

La eficiencia del stack de celdas de la pila de combustible se denomina eficiencia real de la reacción electroquímica e indica la cantidad de energía que se libera cuando el hidrógeno y el oxígeno se combinan para formar agua, según la reacción: $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$

Esta energía es cuantificada experimentalmente a través de la entalpía de la reacción y su valor va a depender de si el agua se forma como un gas o un líquido. En el caso de las celdas de combustible, el agua se forma como un gas y su valor es de -242 kJ/mol H_2O a 25 °C y 1 atmósfera, indicando el signo negativo que la energía es liberada durante la reacción, y no absorbida.

Esta energía liberada disminuye a medida que aumenta la temperatura. Las pilas PEM, operan dentro de un rango definido de temperaturas, de manera que la variación en la energía disponible se produce solamente en un pequeño porcentaje, pero si existe una gran variación cuando empleamos pilas de combustible de alta temperatura, en las que la variación de energía puede ser hasta un 30% inferior. Por esta razón, las pilas de combustible de alta temperatura son inherentemente menos potentes que las pilas de baja temperatura.

Del total de la entalpía de la reacción, no toda está disponible para realizar un trabajo útil, sino que una parte de la entalpía se utiliza en el aumento de la entropía, perdiéndose y el resto se conoce como la energía libre de Gibbs (ΔG^0). Para agua en estado gaseoso a 25 °C y 1 atmósfera se cumple la siguiente ecuación:

$$E = - \Delta G^0 / nF$$

$\Delta G^0 = -229.1 \text{ kJ/ mol } H_2O$
 $E = \text{Voltaje de cada celda.}$
 $F = \text{Constante de Faraday (96500 culombios/ mol de electrones).}$
 $n = \text{número de electrones envuelto en la reacción.}$

En las reacciones en el ánodo ($H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$) y en el cátodo ($1/2O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$), están envueltos dos electrones en la formación de cada molécula de agua, de modo que $n = 2$ moles de electrones para cada mol de agua formada. Sustituyendo valores en la ecuación anterior, obtenemos:

$$E = - \left(-242 \cdot \frac{10^3 \text{ J}}{\text{mol } H_2O} \right) \cdot \frac{1 \text{ mol } H_2O}{2 \text{ moles } e^-} \cdot \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} = 1,187 \frac{\text{ J}}{\text{ C}}$$

$$E = 1.187 \frac{J}{C} \cdot \frac{1 \text{ VA/S}}{1 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ A/S}} = 1,187 \text{ V}$$

Por lo tanto, cada celda puede generar una tensión máxima teórica de 1,187 V (a 25 °C y 1 atmósfera). Para obtener la eficiencia de la pila de combustible realizaremos el cociente entre la tensión real producida y la máxima tensión teórica.

$$\text{Eficiencia} = \frac{V_{\text{real}}}{E} \cong \frac{V_{\text{real}}}{1,2}$$

Las tensiones típicas obtenidas en celdas de combustible real en operaciones de carga normal, están entre 0,5 y 0,6 V pudiendo alcanzar los 1,1 V, en condiciones de circuito abierto, sin carga. Por tanto, la eficiencia electroquímica, puede alcanzar el 90% en condiciones de circuito abierto y situarse en valores entre un 40 y un 50% en condiciones de carga.

4.3.2.- Eficiencia del sistema completo de la pila de combustible.

Una pila de combustible sólo puede funcionar si es alimentada con aire e hidrógeno y refrigerada con algún refrigerante líquido. Los sistemas prácticos requieren equipos adicionales para regular el gas y las corrientes de fluidos, proporcionar lubricación, equipos de operaciones auxiliares, gestión de la salida de la corriente eléctrica y control del proceso. Algunos sistemas incluyen los reformadores de combustible. La totalidad del equipamiento introduce pérdidas y reduce la eficiencia total del sistema desde su rendimiento teórico ideal. La eficiencia del sistema de la pila de combustible se relaciona con el rendimiento global de la planta eléctrica.

Para poder realizar comparaciones significativas entre la eficiencia de las pilas de combustible y otros sistemas de generación de energía, cada planta debería definirse de una manera similar. Si comparamos una pila de combustible con un motor de combustión interna para una aplicación de propulsión, es conveniente definir cada una como un dispositivo que consume combustible y aire, y ofrece una potencia de salida mecánica a un eje de propulsión. En ambos casos, el combustible se extrae de un tanque, en estado gaseoso o líquido, que se ha almacenado después del refinado o de otro tipo de procesamiento. Ambos sistemas comprimen aire atmosférico, los motores de combustión interna mediante la acción de un pistón y la pila de combustible ayudada un compresor externo. Por otro lado, los motores de combustión interna proporcionan energía mecánica a la transmisión directa del eje, mientras que la pila de combustible utiliza un inversor y un motor eléctrico. Ambos sistemas envían el calor residual al entorno utilizando una bomba de líquido refrigerante, o un intercambiador. El rendimiento total de un motor de combustión interna se encuentra entre el 15 y el 25%, pudiendo aumentar a valores entre el 25 y el 30% e incluso más para los motores diesel.

Para una pila de combustible que opera con hidrógeno puro, los rendimientos en general del sistema están aproximadamente entre el 31 y el 39%, obteniéndose estos de multiplicar los valores de eficiencia de los distintos componentes. Estos valores son aproximadamente los siguientes: De 0 al 50% de eficiencia la celda de combustible, un 5% de eficiencia del inversor, un 97% de eficiencia del motor eléctrico y otro 5% para la compresión del aire. Además, cuando se trata de un sistema de celdas de combustible que funciona con un reformador, la eficiencia global del sistema se reduce aún más, alcanzando valores que se sitúan aproximadamente entre el 20 y el 29%, debido a que la eficiencia del reformador, la cual varía entre un 65 y un 75%, según el tipo empleado. Como desventaja, los sistemas de celdas de combustible (incluido el almacenamiento de combustible) son más pesados que los sistemas de motores de combustión interna de potencia y rango comparables, y por lo tanto consumirá más electricidad de forma continua.

Si comparamos la eficiencia de la pila de combustible con las baterías, ambas tienen una eficiencia electroquímica similar. Siguiendo con el ejemplo anterior, si empleamos estas como propulsión, también vamos a necesitar un inversor y un motor eléctrico, aunque estas no requieren compresión de aire, ni equipos de refrigeración complejos, ni reformadores. Por el contrario, las baterías como medios de almacenamiento son más pesadas que las pilas de combustible, aunque esto se compensa en parte con la eliminación de otros componentes.

Los sistemas de pila de combustible presentan mayores eficiencias térmicas, sobre todo para tamaños pequeños y en cargas intermedias. Es esta característica la que proporciona el principal incentivo para los actuales sistemas de pila de combustible desarrollados.

Otro factor de vital importancia para poder valorar la eficiencia global de un sistema recae sobre la fuente de combustible empleada.

- En el motor de combustión implica el refinamiento de combustibles con hidrocarburos.
- En un sistema de baterías implica la fuente de energía eléctrica para la carga de las mismas.
- En una pila de combustible, implica la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles o por medio de la electrólisis del agua, o la producción de combustibles secundarios, como el metanol para su uso con un reformador a bordo.

Las plantas de energía con pila de combustible están capacitadas para operar con combustibles fósiles reformados tales como metanol o gas natural. Además, la mejorada eficiencia térmica de las pilas de combustible, comparada con otros generadores que usan combustibles fósiles, proporciona una reducción de costes de combustible, a la vez que disminuye la contaminación medioambiental.

En una planta de energía de pila de combustible, la selección del combustible y del oxidante, van a incidir en la configuración, las características de funcionamiento y la eficiencia total del sistema. La configuración de planta más eficiente se basa en reactivos puros, hidrógeno y oxígeno. Esto, no siempre es posible, debido a que la mayoría de las aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno puro y oxígeno son impracticables. En el caso de las pilas PEM se emplea el aire como oxidante, de manera que la eficiencia energética de las celdas es menor en comparación con la operación con oxígeno puro, existiendo además una reducción adicional asociada a la compresión de aire. Sin embargo, esto queda totalmente compensado por la eliminación del almacenamiento de oxidante en la planta.

Lo mismo que ocurre con el oxidante, se puede aplicar al combustible. Para ciertas aplicaciones, el almacenamiento de hidrógeno puro es poco práctico debido a su baja densidad de energía almacenado y las carencias en infraestructuras. En estos casos, se puede emplear el gas natural (donde este disponible) o combustibles líquidos, como el metanol, el gasoil o el queroseno reformados en una rica corriente de hidrógeno para la operación de la pila de combustible. El principal problema del reformado es la reducción global de la eficiencia del sistema, así como el aumento de la complejidad y el tamaño de la planta de energía.

A continuación se desarrollan los principales sistemas de alimentación de combustible y oxidante empleados en una planta de energía con pila de combustible PEM.

- **Sistema de alimentación hidrógeno – aire.**

El empleo del hidrógeno puro como combustible y el aire comprimido como oxidante, es el método más simple y más eficiente en los sistemas de pilas de combustible empleados para la alimentación de plantas estacionarias o para la propulsión de automóviles, autobuses o pequeñas embarcaciones, como en nuestro caso.

La figura 4.7 se muestra un esquema simplificado del funcionamiento de una planta de energía con pila PEM de combustible, alimentada con hidrógeno y aire. En esta, la alimentación del hidrógeno (1) se realiza desde un tanque de almacenamiento, donde se encuentra comprimido en botellas de gas, o bien como hidrógeno líquido criogénico, o como hidruro. El hidrógeno es humidificado (2) y alimentado a las celdas de la pila de combustible (3). El compresor de gas (4), recircula el hidrógeno en exceso, en torno al 1,5 sobre el estequiométrico, a través de la pila, manteniendo un sistema cerrado para la entrega de combustible. Es de suma importancia para el mantenimiento de un sistema cerrado, la pureza del hidrógeno. Para la eliminación periódica de las impurezas adquiridas durante el almacenamiento en los tanques, se puede instalar en el ánodo una válvula de purga (5).

La alimentación del oxidante se realiza mediante aire del ambiente (6), el cual debe filtrarse. Posteriormente se aumenta su presión, haciéndolo pasar a través del compresor (8), se humedece (9) y se alimenta a las celdas (3). Mediante el empleo de un condensador, se elimina el agua producida (10) del aire de escape, que en un intercambiador de calor calienta la corriente de aire entrante.

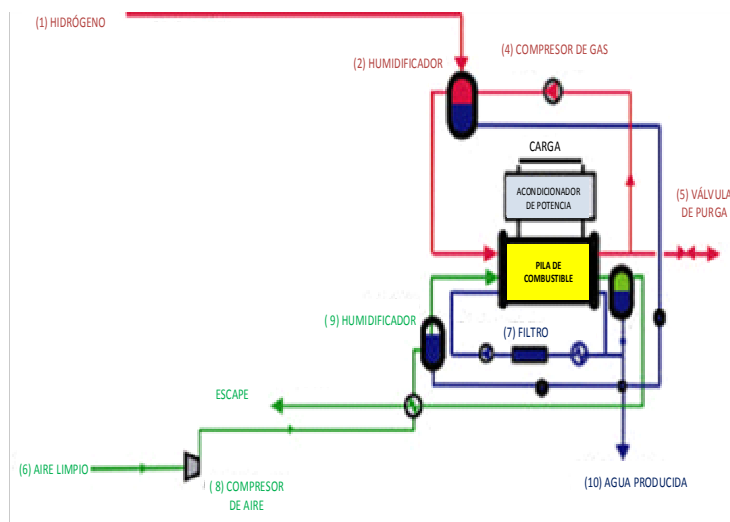


Figura 4.7.- Esquema de una planta de energía con pila de combustible PEM alimentada con hidrógeno y aire.

La presión normal de operación de estos sistemas, esta en torno los 2 Bar y mediante un circuito cerrado de refrigeración, se mantiene alrededor de los 80°C la temperatura de funcionamiento de la pila. El sistema de refrigeración, además de tener integrados el condensador y los humidificadores, lleva instalado un filtro de ionizantes, cuya función es mantener los niveles de pureza del agua, evitando así corrientes de fuga de la pila y previniéndola de contaminación por iones no deseados en la membrana.

- **Sistema de alimentación hidrógeno – oxígeno.**

Las pilas de combustible generan mayores voltajes en las celdas y una mejor eficiencia cuando funcionan con oxígeno puro en vez de con aire. Además, el empleo de oxígeno puro, supone la supresión de la compresión del aire, dando lugar a sistemas más silenciosos y con menos pérdidas que los sistemas que emplean aire.

No obstante, el empleo del oxígeno puro como el oxidante para la operación de la celda de combustible, esta limitado normalmente a aplicaciones donde el aire del ambiente no está disponible. Ya que en estos casos, el oxígeno debe ser almacenado como gas comprimido o como líquido criogénico, aumentando el tamaño y el peso del sistema, así como el mayor coste del oxígeno puro con respecto al aire comprimido.

El funcionamiento de este tipo de plantas alimentadas con hidrógeno y oxígeno (figura 4.8), es muy similar al de una planta de energía con pila PEM de combustible, alimentada con hidrógeno y aire. La alimentación del hidrogeno (1), se realiza del mismo modo, desde un tanque de almacenamiento, donde se encuentra comprimido en botellas de gas, o bien como hidrógeno líquido criogénico, o como hidruro. El hidrógeno es humidificado (2) y alimentado a las celdas de la pila de combustible (3). El compresor de gas (4), recircula el hidrógeno en exceso, en torno al 1,5 sobre el estequiométrico, a través de la pila, manteniendo un sistema cerrado para la entrega de combustible

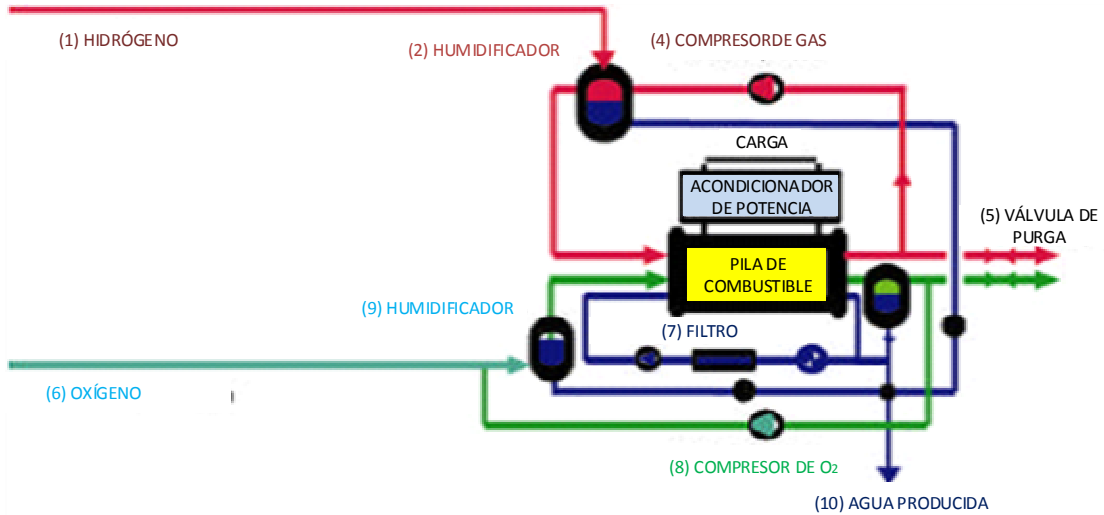


Figura 4.8.- Esquema de una planta de energía con pila de combustible PEM alimentada con hidrógeno y oxígeno.

La diferencia con un sistema alimentado por aire radica en la corriente de oxígeno, que al igual que la de hidrógeno, se distribuye a través de la pila de combustible en exceso, ayudada por el compresor de recirculación. Cuando los tanques de almacenamiento de los reactivos disponen de las presiones adecuadas de entrega, se pueden sustituir los compresores por eyectores, eliminando así las pérdidas parásitas asociadas a la recirculación de los gases.

Para la eliminación periódica de las impurezas adquiridas durante el almacenamiento en los tanques, se deben instalar en el ánodo las válvulas de purga (5), ya que aunque estos sistemas suelen tener la finalidad de operar dentro de un entorno cerrado funcionando por lo tanto como sistemas cerrados y siendo el único flujo de escape de la planta el agua producida, esto no es así, debido a las impurezas en las fuentes de hidrógeno y de oxígeno, que se acumulan en concentraciones dentro de los bucles de recirculación y deben ser eliminadas. Inertes en el suministro de combustible y oxígeno, serán absorbidos y eliminados de la pila a través del agua producida. La exigencia en la depuración de auxiliares se determina por el grado de pureza para los dispositivos de almacenamiento de reactivos, la vida operacional de la planta de energía, y las condiciones de funcionamiento del sistema.

- **Sistema por reformado del combustible.**

Al igual que ocurre con el oxígeno puro, el empleo de hidrógeno puro como combustible es lo más adecuado para la celda de combustible tipo PEM, mejorando el tamaño, la sencillez y la eficiencia global de la planta eléctrica. Sin embargo, presenta el problema de la baja densidad energética de almacenamiento del hidrógeno puro, ya sea en estado sólido, líquido, o gaseoso.

Mediante el proceso químico de reformado (expuesto en el punto 2.4.1), es posible extraer hidrógeno a partir de ciertos combustibles que lo contienen como el petróleo, el gas natural o el metanol. Dentro de estos combustibles, los más interesantes son el metano, por ser el componente mayoritario del gas natural, del cual existen grandes reservas y el metano, debido a su facilidad de almacenamiento. No obstante es importante reseñar que el metanol presenta una mayor toxicidad que los hidrocarburos líquidos presentes en la gasolina o el diesel.

El reformado, supone un aumento de tamaño, complejidad y coste en un sistema de pila de combustible. Las ineficiencias del proceso de reformado reducen la eficiencia global de una planta con pila de combustible. Además, el proceso de reformado produce óxidos de carbono que deben ser expulsados desde de la planta de energía. Esto presenta un desafío de diseño importante para la aplicación de los sistemas de reformado en ambientes de operación cerrados.

Dependiendo de la pureza del hidrógeno producido en la planta de energía con pila de combustible PEM y reformador integrado (figura 4.9) el subsistema de la pila de combustible seguirá siendo en esencia el mismo que para una planta de energía basada en hidrógeno, cuando el procesador de combustible obtenga hidrógeno puro. En este caso, el hidrógeno puro es recirculado a través de las celdas de combustible en un circuito cerrado, realizando únicamente las purgas periódicas necesarias para eliminar las impurezas no deseadas de la fuente de combustible.

Por el contrario, si el procesador de combustible ofrece una corriente de hidrógeno diluido con una cantidad considerable de óxidos de carbono provenientes del proceso de reformado, la estructura a emplear para la pila de combustible debe ser de circuito abierto. El combustible rico en hidrógeno es enviado en exceso a la pila de combustible, mientras el combustible de escape, que aún contiene hidrógeno, es enviado de vuelta al procesador del combustible para proporcionar calor al proceso.

Las pilas de combustible PEM son compatibles con flujos de combustible que contienen un 30% o más de dióxido de carbono, pero los niveles de CO (veneno del platino del catalizador) a la entrada de la pila, deben mantenerse en valores inferiores a 10 ppm. Para reducir las concentraciones de CO entrantes desde el procesador de combustible se puede realizar un flujo

de purga de aire mezclado con el combustible a la entrada de la pila. No obstante esto supone una merma de la eficiencia de la pila, debido a que se quema un poco de combustible de hidrógeno.

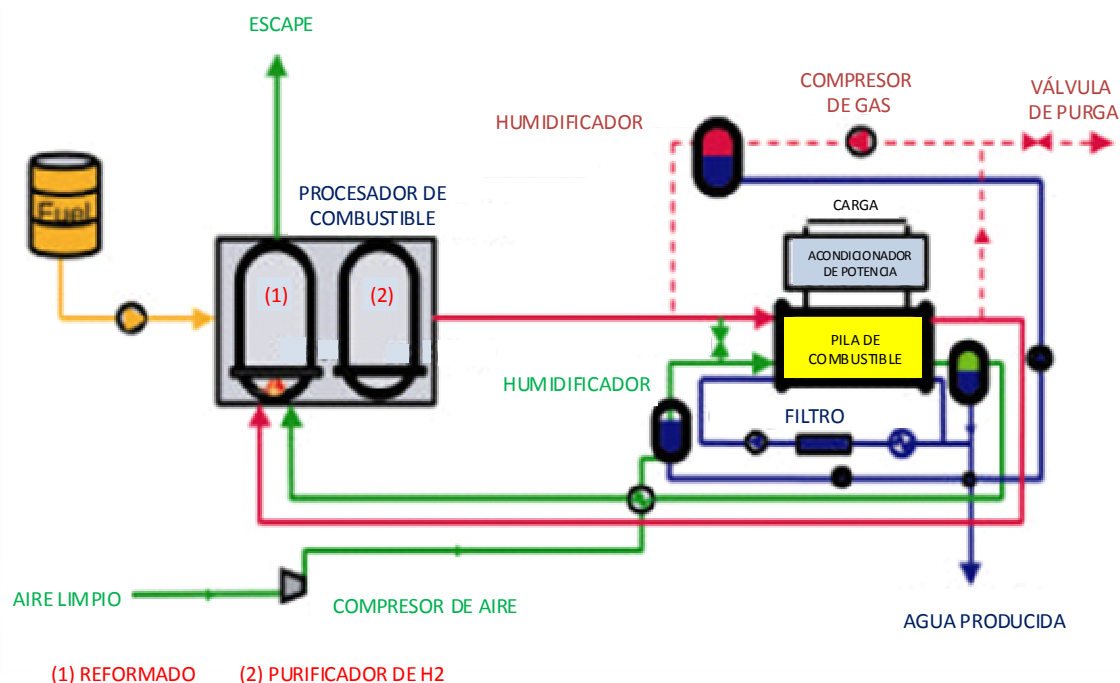


Figura 4.9.- Esquema de una planta de energía con pila de combustible PEM y reformador integrado.

4.4.- APLICACIONES DE LA PILA DE COMBUSTIBLE PEM.

La tecnología de las pilas de combustible PEM, ha experimentado en los últimos años un gran desarrollo para aplicaciones estacionarias, de transporte o como sistemas de alimentación portátil. Esto es debido a las ventajas que presentan este tipo de pilas PEM, entre las que se encuentran su baja temperatura de funcionamiento (80°C) que permite alcanzar rápidamente la temperatura operativa, su capacidad para variar rápidamente su salida para atender cambios en la demanda, así como disponer de la mayor densidad energética de entre todas las pilas de combustible. Además, el electrolito polimérico sólido ayuda a minimizar la corrosión y evita problemas de gestión.

Como ya se menciona anteriormente, otra gran ventaja que representa el empleo de este tipo de pilas es la nula generación de emisiones contaminantes en el punto de aplicación, cuando utilizan directamente hidrógeno como combustible. Cuando se utilizan pilas alimentadas con otros combustibles que deben ser transformados para obtener hidrógeno, durante esta transformación, se emiten gases contaminantes como monóxido de carbono y gases de efecto invernadero, pero siempre en menor medida que los producidos por un motor de combustión interna. Por tanto, en cualquiera de los dos casos estaremos ante una energía más limpia y eficiente.

4.4.1.- Aplicación en Sistemas de alimentación portátil.

Este tipo de sistemas pueden emplearse en múltiples aplicaciones que actualmente emplean baterías. Existen unidades comerciales, como la empleada en nuestro “Barco 0.0” fabricada por la empresa “Heliocentris”, que proporcionan una potencia eléctrica de hasta 1.2 kW.

4.4.2.- Aplicación en Plantas Estacionarias.

Es cada vez más interesante la aplicación de las pilas de combustible para la generación de energía eléctrica, debido a que son mucho más limpias que los sistemas tradicionales. Una planta de generación de energía eléctrica de unos 1000 kW, utilizando gas natural como fuente de hidrógeno produce aproximadamente 0,03 kg de emisiones nocivas para el medio ambiente (excluyendo CO₂), mientras que la misma planta utilizando propano directamente produciría unos 11 kg de emisiones. Si comparamos las centrales eléctricas que utilizan carbón con las pilas de combustible, la diferencia se incrementa notablemente, ya que estas últimas producen un 97% menos de emisiones.

Las centrales eléctricas estacionarias con pilas de combustible son candidatas obvias para la operación con uso de combustibles convencionales reformados posteriormente, como puede ser el gas natural. Además de la alta eficiencia en operación, las bajas emisiones y una buena respuesta transitoria, como características de los sistemas de pila de combustible, las aplicaciones fijas pueden aumentar aún más su eficiencia general, gracias al aprovechamiento de la gran cantidad de agua caliente y calor residual generado.

Empresas como “Lancea”, llevan años trabajando en la fabricación y desarrollo de pilas de combustible para la aplicación en plantas estacionarias. En la planta de fabricación de cloro de AkzoNobel, en el municipio de Delfzijl en los Países Bajos, se encuentra instalado un sistema de aprovechamiento de hidrógeno de pilas de combustible PEM, compuesto por 12 stacks de 75 celdas cada uno conectados en serie. La potencia generada inicialmente era de 50 kW operando con una eficiencia de conversión de hidrógeno del 57%, aunque recientemente los niveles se han elevado hasta 70 kW disminuyendo la eficiencia al 53%. La generación de potencia pico es de 120 kW. Hasta noviembre de 2010, la planta había generado 900 MWh de energía eléctrica después de 18000 horas de funcionamiento. El sistema de pilas se encuentra alojado en un contenedor de transporte marítimo estándar.

En la primavera de 2011, la empresa química Solvay, tras los resultados obtenidos en AkzoNobel instaló un sistema de pilas de combustible tipo PEM de 1 MW en su planta de producción de Cloro situada en Lillo, cerca de Antwerp (Bélgica). Esta planta consiste en una serie de módulos conectados en paralelo que permiten su funcionamiento ininterrumpido. Además, el agua producida en la conversión del hidrógeno se recuperará y se utilizará en el proceso de

producción. En la figura 4.10, se puede ver un sistema de pila de combustible (12.000 celdas) estacionario aplicado a la industria del cloro. Esta planta genera 1 MW de energía eléctrica y 1 MW de energía térmica con una eficiencia eléctrica del 50 % y del 80% si incluimos la recuperación del calor como subproducto. Es interesante especialmente la aplicación de esta tecnología en las plantas de generación de cloro, debido a que el hidrógeno, es un subproducto de la industria del cloro.



Figura 4.10.- Esquema sistema de pila de combustible estacionario aplicado a la industria del cloro.

La empresa Ballard, también dispone de sistemas de generación de energía, mediante el empleo de pilas de combustible, en concreto el MF-CIH, que proporciona energía constante y continua desde 100 kW, hasta 1 MW. Aunque una potencia de 1 MW pueda parecer pequeña en comparación con las centrales de generación convencionales, es suficiente para el suministro de barrios aislados en casos de emergencia o para proporcionar energía de reserva para instalaciones críticas, como el caso de los hospitales. Además estos elementos al ser modulares, se pueden acumular conectándolos en paralelo, para así generar mayores potencias.

La empresa Stuart Islans Energy Initiative, ha construido un sistema 100% libre de emisiones en Stuart Island en el estado de Washington. Se trata de un programa piloto en donde se ha construido un sistema formado por paneles solares que generan corriente eléctrica para el accionamiento de varios electrolizadores que producen hidrógeno, el cual es almacenado entre 10 y 80 bares de presión en depósitos de 1,900 l para alimentar la pila de combustible. La energía generada por la pila se emplea para fines residenciales en la isla.

4.4.3.- Aplicación en el Transporte Terrestre.

Los vehículos proporcionan el principal estímulo para el desarrollo de las celdas de combustible, debido al gran número de estos, siendo además uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental y acústica dentro de las ciudades. No obstante, la implantación de las pilas de combustible en estos, aún presenta ciertos desafíos, como son su tamaño relativamente pequeño (automóviles y motocicletas), la gran infraestructura necesaria para el abastecimiento de combustible y los hábitos del público en general.

- **Automóviles.**

Muchas compañías de automóviles importantes están inmersas en programas de desarrollo de celdas de combustible para la automoción, incluyendo Daimler-Chrysler, Ford, General Motors, Nissan, Mazda, Subaru, Toyota, Honda y Hyundai. Las empresas de automoción siguen investigando y ya existen numerosos prototipos y modelos de vehículos basados en la tecnología de celdas de combustible.

Para el desarrollo del automóvil con motor de hidrógeno a nivel popular, queda muy poco, aunque todavía se deben superar una serie de retos, entre los que se encuentran, la falta de competitividad en rentabilidad, la seguridad, la legislación inexistente, el almacenamiento y transporte, la fiabilidad de la tecnología, la falta de infraestructura y el desconocimiento del consumidor.

A pesar de que las baterías convencionales, todavía tienen que evolucionar para ser recargadas en el mismo tiempo que un tanque de hidrógeno, para generar la misma potencia y autonomía, el desarrollo del coche eléctrico puro lleva ventaja a las aplicaciones de pila de combustible. No obstante varios coches con pila de combustible ya están rodando por el Mundo, entre los que se encuentran:

El "Panda Hydrogen" desarrollado por Fiat en el año 2006 en colaboración con el Ministerio de Medio Ambiente italiano. Se trata de un prototipo de automóvil motorizado con un sistema de propulsión de celda de combustible alimentado con hidrógeno. El sistema está compuesto por tres celdas de combustible (fabricadas por Nuvera, empresa Italoamericana líder en producción de pilas de combustible), un turbocompresor para la alimentación de las pilas con aire, una instalación de humidificación y refrigeración y una serie de componentes auxiliares. El hidrógeno que alimenta las celdas de combustible se almacena, a 350 bares, en un depósito de material compuesto, instalado bajo el piso posterior del vehículo. Este propulsor desarrolla una potencia de 60 kW, suficientes para permitir al automóvil alcanzar una velocidad máxima de 130 km/h, una aceleración de 0 a 50 km/h en 5 segundos y una autonomía de 200 km en circuito urbano. Con un tiempo de repostaje inferior a 5 minutos.

La compañía Honda, en el año 2008, fue la primera en homologar un vehículo con pila de combustible para su comercialización en Japón y Estados Unidos. Se trata del “Honda FCX Clarity”, una berlina de cuatro puertas con una pila de combustible de 67 kg de peso, que se encuentra situada entre los asientos delanteros (gracias a su pequeño volumen y disposición vertical), ocupando un espacio de 52 l. Además lleva dos depósitos cilíndricos presurizados entre los asientos traseros y el eje posterior, en los que se almacena 171 litros de hidrógeno a 340 atm de presión, equivalentes a 5 kg gas, proporcionando una autonomía al vehículo de 430 km.

Para el repostaje, Honda diseñó un generador de hidrógeno alimentado con gas natural denominado “Home Energy Station”. Este generador es del tamaño de un surtidor de gasolina y está funcionando continuamente. Cuando no genera hidrógeno para el vehículo, utiliza el que produce para generar electricidad doméstica mediante el empleo de una pila de combustible.

La compañía Hyundai, comercializará a partir del año 2014 el Hyundai ix35 FCVE. Este será capaz de generar una potencia máxima de 100 kW (136 CV), con un consumo de 0,96 kg de Hidrógeno por cada 100 kilómetros recorridos. El vehículo lleva almacenados 5,64 kg de Hidrógeno a una presión de 700 bares, lo que le proporciona una autonomía máxima de 560 Km. En la figura 4.11, se puede ver la toma para realizar el repostaje de hidrógeno en el vehículo. En el apartado de prestaciones encontramos una velocidad máxima de 160 km/h y una aceleración de 0 a 100 km/h en un tiempo de 12,5 segundos. La propuesta con este vehículo, es doblemente innovadora, ya que solamente se venderá como un leasing con una duración de tres años, en los que se incluye además del total mantenimiento del vehículo, el repostaje del mismo durante los 36 meses que dura el contrato. Esto permitirá a Hyundai hacerse con todas las unidades comercializadas una vez cese la vida del proyecto. El principal inconveniente con el que cuentan actualmente para la comercialización en masa de este vehículo, es el escaso número de “hidrogeneras”, contando únicamente con 10 de estas en los Estados Unidos.



Figura 4.11.- Toma de repostaje del Hyundai ix35 FCVE.



Figura 4.12.- Propulsor del Toyota FCHV PEM FC.

Toyota, por su parte, pretende en el año 2015 tener listo para su comercialización en Europa, Estados Unidos y Japón, un nuevo sedán de pila de combustible denominado Toyota FCHV PEM FC (figura 4.12), que contará con la mayor densidad de potencia del mundo (3 kW /

litro) y una autonomía superior a 500 km. El objetivo es conseguir un vehículo fiable, sin emisiones nocivas y con unas prestaciones y autonomía similares a los vehículos Diesel y de gasolina.

También en el terreno deportivo, se está introduciendo esta tecnología. Las grandes ventajas de la pila de combustible de hidrógeno en la competición empleando la propulsión eléctrica son el peso, los tiempos de recarga y la autonomía, comparado con los sistemas convencionales de propulsión eléctrica mediante baterías. En este año 2013, ha participado en las 24 horas de Le Mans (carrera de resistencia para automóviles) el "Green GT H2" (figura 4.13) se trata de un vehículo que desarrolla una potencia máxima de 460 CV, con un par máximo de 2.400 Nm y para un peso de tan solo 1.240 kg, siendo capaz de alcanzar los 300 km/h.

De lo visto anteriormente, se deduce que en periodo de tiempo muy corto, nuestras ciudades y carreteras podrán estar ocupadas por vehículos propulsados por pilas de combustible de hidrógeno, con cero emisiones de contaminación tanto acústica como ambiental. Solo es cuestión de una mejora en la infraestructura para el repostaje de los mismos.



Figura 4.13. "Green GT H2" Vehículo de competición propulsado por una pila de combustible de hidrógeno.



Figura 4.14. Suzuki Burgman Fuel – Cell.

- **Motocicletas.**

En el apartado podemos destacar, la Suzuki Burgman Fuel – Cell (figura 4.14), que acaba de conseguir algo digno de mención y felicitación, como es el hecho de que la Unión Europea haya homologado, por primera vez, un motor de célula de combustible.

Para desarrollar esta tecnología, en Suzuki han invertido en un motor que utiliza una célula de combustible del tipo polímero-electrolito fabricada por Intelligent Energy que está refrigerada directamente por aire. Además dispone de una batería de ión-litio que proporciona una intensidad extra de corriente en las aceleraciones y reserva para cuando se acabe el hidrógeno. Para el almacenaje del combustible, se ha destinado un pequeño espacio a modo de tanque de hidrógeno reforzado para contener el hidrógeno a alta presión (700 bar), con lo que se declara una autonomía de 350 km, rodando en llano a una velocidad 30 km/h. Con esta moto, además de

la ausencia de emisiones se evita el clásico ruido tan molesto de este tipo de motos, que al utilizar el hidrógeno como fuente de energía se vuelve completamente discreto y silencioso.

Como ocurre con el caso de los automóviles, el principal problema se encuentra en los puntos de repostaje. En España, a día de hoy, solamente disponemos de cuatro situados en Madrid, Barcelona, Zaragoza y, la última, en Sanlúcar la Mayor (Sevilla).

- **Autobuses.**

Los autobuses, en concreto los urbanos, son comercialmente las aplicaciones más avanzadas de las pilas de combustible actualmente. La introducción de tecnología de celdas de combustible en el sector transporte es el punto de partida más lógico ya que ofrecen una gran plataforma para los componentes del sistema y el almacenamiento de combustible, además de poder ser alimentados de combustible en una estación central, y tener un mantenimiento periódico por personal capacitado.

Esta tecnología aplicada en los autobuses representa una alternativa económica y con grandes beneficios medioambientales, si lo comparamos con los tradicionales autobuses con motor diesel, ya que obtenemos ausencia de emisiones de óxidos nitrosos, sulfuros, etc...

En mayo del 2005, dentro del proyecto CUTE (Clean Urban Transport for Europe), iniciado a finales del año 2000, cuando la Comisión Europea logró que varias empresas privadas, entre las que destacan Daimler Chrysler, British Petroleum y Shell Hydrogen, se comprometieran a poner en marcha una iniciativa sin precedentes consistente en el desarrollo y puesta en circulación de autobuses urbanos equipados con célula de combustible y producidos en serie, se recibió en España, en concreto en Madrid el primer autobús propulsado por pila de combustible. Se trataba del modelo "Citaro", fabricado por Mercedes-Benz con capacidad para más de 70 pasajeros, con una velocidad máxima de 80 km/h y una autonomía de 200 kilómetros. En ese momento, en Madrid ya funcionaban tres autobuses con un sistema híbrido de pila de combustible y motor de combustión fabricados por Irisbus-Iveco.

Actualmente Mercedes-Benz ha desarrollado el nuevo Citaro FuelCELL-Hybrid con tecnología de pila de combustible. En comparación con los autobuses de pila de combustible probados desde 2003 en los proyectos CUTE este ofrece grandes novedades como son la hibridación con recuperación de energía y almacenamiento en baterías de ión de litio, los potentes motores eléctricos en los cubos de los bujes de las ruedas con una potencia continua de 120 kW, los componentes eléctricos y las pilas de combustible más avanzadas. Estas pilas tendrán una mayor vida útil de al menos cinco años o 12.000 horas de funcionamiento. Gracias a la mejora de los componentes de la pila de combustible y a la hibridación con baterías de ión de litio, el nuevo

Citaro FuelCELL-Hybrid ahorra un 50% de hidrógeno respecto a la generación anterior y su autonomía supera los 300 km.

4.4.4.- Aplicación en el Transporte Aéreo.

La ventaja de utilizar las pilas de combustible en la aviación es la capacidad de generación eléctrica con un alto nivel de eficiencia y bajos niveles de emisión. Además, el proceso básico que tiene lugar dentro de una pila de combustible no genera ruido ni vibraciones.

En el año 2008, la compañía Boeing utilizó por primera vez la pila de combustible en un vuelo tripulado. Para ello, modificó una avioneta biplaza de 16.93 m de envergadura, denominada "Dimona" (figura 4.15), en la cual instaló un sistema de pila de combustible alimentado con hidrógeno y baterías de litio, para los momentos de demanda extra de energía. Este sistema, generaba la energía para alimentar a un motor eléctrico acoplado a una hélice convencional. Las pruebas de la aeronave, se llevaron a cabo en el aeropuerto de Ocaña, al sur de Madrid y durante los vuelos la avioneta alcanzó los 1000 metros sobre el nivel del mar. Para el despegue y el aterrizaje se utilizó el aporte extra de las baterías de litio, pero una vez alcanzada la altura de crucero, se desconectaron las baterías y el piloto mantuvo el vuelo a una velocidad de 100 km/hora durante 20 minutos utilizando únicamente la energía de la pila de hidrógeno.



Figura 4.15.- Avioneta biplaza "DIMONA".



Figura 4.16.- Avión ANTARES DLR-H2.

En julio de 2009, los ingenieros del Centro Aeroespacial Alemán, presentaron el "Antares DLR-H2" (figura 4.16), avión monoplaza con una envergadura de 20 metros y unos 660 kilos de peso, se trataba del primer avión impulsado únicamente por pilas de combustible de hidrógeno. Realizó su primer vuelo de media hora de duración en el aeropuerto de Hamburgo, en Alemania, alcanzando velocidades de 170 km/h, con una capacidad de deslizamiento totalmente silenciosa gracias a su motor eléctrico de alta eficiencia. El sistema de células de combustible proporciona 25 kW de energía, más que suficiente para cubrir todas las necesidades del avión, el cual sólo requiere una potencia de 10 kW de crucero. La eficiencia total del sistema es de aproximadamente un 44%, es decir, el doble de la eficiencia de un sistema convencional de combustión interna.

En la actualidad, aun no es posible alimentar con pilas de combustible de hidrógeno a los grandes aviones comerciales, ya que para conseguir la eficiencia energética necesaria, se requiere de tecnologías que por el momento no están disponibles. Sin embargo, las células de hidrógeno si que podrían comenzar a utilizarse como modo complementario de producir energía eléctrica a bordo o para otros fines como los anteriormente comentados.

4.4.5.- Aplicación en el Transporte Marítimo.

- **Submarinos.**

La industria militar ha sido tradicionalmente, uno de los principales agentes desarrolladores de nuevas tecnologías e innovaciones, su nivel de financiación y alto coste asumible por cada dispositivo, permiten el desarrollo de una nueva tecnología, cuyos beneficios acaban transfiriéndose a nivel del consumidor al cabo de un tiempo. La propulsión de los submarinos mediante pilas de hidrógeno, ofrece desde el punto de vista táctico importantes ventajas, como su funcionamiento extremadamente silencioso, la ausencia de residuos (solo agua) y la baja temperatura de operación, además como ocurre con los sistemas de plantas estacionarias, el agua caliente producida puede ser utilizada para usos domésticos a bordo del submarino.

La iniciativa más destacable de integración de pilas de combustible en submarinos partió de Alemania, con el desarrollo del submarino de ataque clase U212, incorporando entre los años 2003 y 2006 cuatro unidades de estos a su flota. Estos submarinos utilizan un sistema de propulsión diesel y un sistema Siemens de pila de combustible tipo PEM de 34 kW, alimentada con oxígeno (99.5% pureza) e hidrógeno puro (99.99% ausente de CO y azufre). Este módulo, denominado BMZ 34 (figura 4.17), consiste en un stack de 72 celdas individuales y los correspondientes equipos auxiliares. Para su aplicación en el submarino y con el fin de incrementar la seguridad del sistema, la pila de combustible se encapsula en un contenedor lleno de nitrógeno.

El submarino incorpora tanques de doble capa, aislados al vacío, donde se almacena el oxígeno en estado líquido (LOX). El tamaño del tanque de almacenamiento de oxígeno es un factor limitante de las diferentes tecnologías, por lo que los sistemas de pila de combustible, con el consumo de oxígeno más bajo de entre todo el resto de opciones, ofrece el mayor tiempo de residencia del submarino sumergido. Por su parte, el hidrógeno se almacena en cilindros de hidruros metálicos. En ellos, las aleaciones metálicas (basadas en aluminio, magnesio o tierras raras), absorben el hidrógeno en su estructura, luego las moléculas están empaquetadas muy juntas. Este método de almacenamiento es considerado el más seguro y el que proporciona una mayor densidad volumétrica, además al no ser necesario su mantenimiento, los cilindros se pueden disponer en la parte exterior del casco.

Posteriormente a este módulo PEM BZM 34, Siemens siguió trabajando en el desarrollo del mismo, con el fin de incrementar la densidad de potencia por un factor de dos y compactar los equipos periféricos. El resultado fue el módulo un modulo PEM BZM120 (figura 4.18) con un stack compuesto por 72 celdas individuales capaz de suministrar 120 kW y unas dimensiones similares al módulo PEM BMZ 34.



Figura 4.17.- Módulo pila PEM BZM 34.



Figura 4.18.- Módulo pila PEM BZM 120.

A mediados del año 2013, la armada Alemana ha incorporado dos nuevos submarinos de tipo 212 A, siendo estos unos de los más silenciosos y modernos en el mundo. Están equipados con sistema de propulsión independiente de aire (AIP), que les permite mantenerse sumergidos por periodos extensos de tiempo. Tienen un desplazamiento de 1.450 toneladas en superficie y 1.800 toneladas sumergido, su eslora es de 57.2 metros, desarrollan una velocidad de 20 nudos y tienen cabida para 27 tripulantes.

Se espera para el año 2017, que el astillero Español Navantia, finalice la construcción de dos submarinos tipo S-80, similares a los 212 A de la armada alemana. Llevarán incorporado un avanzado sistema de Propulsión independiente de Aire (AIP) basado en una pila de combustible de 300 MW, desarrollada por la empresa estadounidense UTC Power. Los sistemas AIP (Air Independent Propulsion) hacen referencia a las tecnologías que permiten al submarino permanecer sumergido durante largos periodos de tiempo sin necesidad de disponer de una fuente de oxígeno.

- **Barcos.**

La aplicación de la pila de combustible en los barcos es la que nos afecta más directamente en el objetivo de este Proyecto. Uno de los problemas en que más se esta incidiendo hoy en día en el sector marítimo, son las emisiones atmosféricas de contaminantes originadas por la flota marítima mundial.

Según la Organización Marítima Internacional (OMI), se estima que el transporte marítimo generó el 3,3% de las emisiones atmosféricas contaminantes globales durante 2007 (informe del UNCETAC 2012), y el 2,7% de las emisiones globales de CO². Si no se realizan políticas globales de control de estas emisiones, podrían aumentar entre un 200% y un 300% en el año 2050 (en

comparación con las emisiones de 2007) debido al continuo crecimiento previsto del tráfico marítimo internacional. No obstante, gracias a ciertas medidas que afectan a la tecnología de los buques y a los combustibles se puede lograr un cierto grado de eficiencia energética y reducir las tasas de intensidad de las emisiones de GEI (CO_2 por tonelada y milla) entre un 25% y un 75% con respecto a los niveles actuales. Además, la industria de transporte marítimo internacional considera que, gracias a los esfuerzos conjuntos y combinados, técnicos y operativos, debe ser posible que en 2020 se haya reducido entre un 15% y un 20% las emisiones de CO_2 por tonelada de carga por kilómetro. Por este motivo, nuevas tecnologías y nuevos combustibles deben ser introducidos en el sector.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x), los componentes orgánicos volátiles (VOC) y el problema de partículas son los objetivos principales actualmente, mientras que la reducción de CO_2 será un objetivo más a largo plazo.

Aunque existen varias tecnologías que reducen las emisiones de contaminantes de los equipos marinos convencionales, cada una de ellas, actúa únicamente sobre un contaminante específico, siendo por tanto necesario emplear para la eliminación de varios contaminantes más de un equipo actuando simultáneamente.

Actualmente, las pilas de combustible de hidrógeno están despertando un gran interés en el mercado de la energía, ya que además de los beneficios medioambientales que aportan, tienen el potencial de proporcionar los requerimientos energéticos necesarios para los distintos tipos de embarcaciones. La evolución en el sector marítimo seguida por esta tecnología hasta llegar a la actualidad se detalla a continuación.

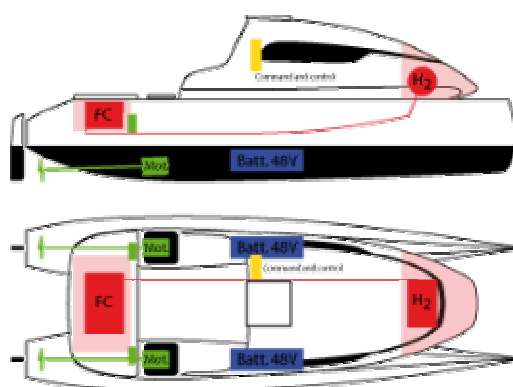


Figura 4.19.- Estructura e imagen del Catamarán, Hydroxy 3000.

En el año 2003, se presentó en Suiza el catamarán, Hydroxy 3000, desarrollado por el Instituto de Energía y Sistemas Eléctricos (IESE) de Suiza, en el marco del proyecto Hydroxy. Este dispone de una pila de combustible PEM de 3 kW que funciona en paralelo con baterías. La pila está alimentada por hidrógeno procedente de una botella de 76 litros a 200 bar. Un compresor se

encarga de proporcionar el aire del que la pila extrae el oxígeno. El sistema se refrigera con un circuito de agua desionizada que se enfría en un intercambiador de calor con agua de lago.

El catamarán Hydroxy 3000 (figura 4.19) pesa 1500kg y tiene capacidad para 7 personas. Su autonomía es de 12 horas y alcanza velocidades comprendidas entre 5 y 8 nudos.

En agosto del 2008, en Hamburgo, se presentó el primer barco de pasaje con un sistema híbrido de pila de combustible y baterías de gel denominado Zemships (Zero Emissions Ships). La empresa *Proton Motor*, fabricante experto en pilas de combustible y sistemas híbridos fue la encargada de suministrar el sistema de propulsión de la embarcación.

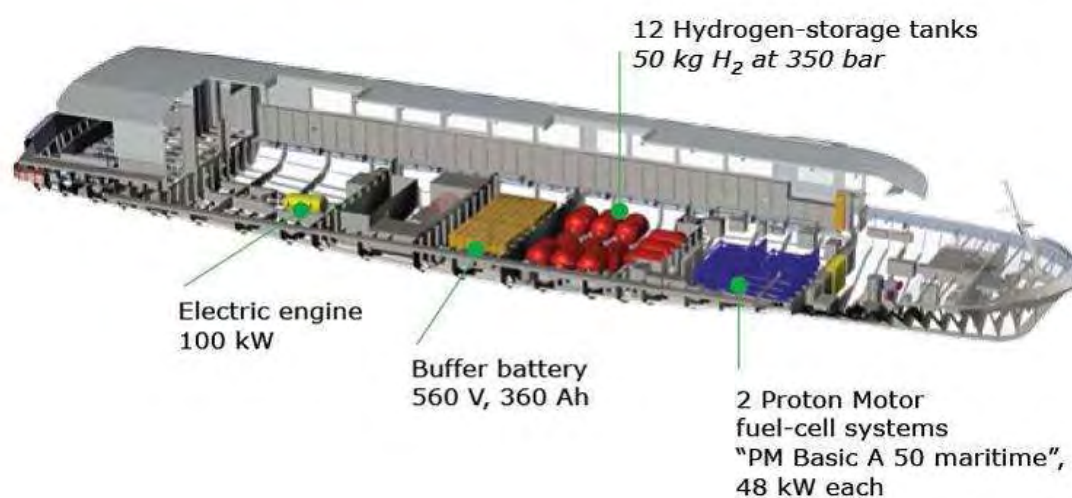


Figura 4.20.- Ubicación de los elementos que componen el sistema de propulsión en el barco de pasaje Zemships.

El barco tiene capacidad para el transporte de 100 pasajeros y dispone de un motor híbrido impulsado por dos pilas de combustible capaces de generar 50 kW de potencia cada una de ellas. En la figura 4.20, se muestra la ubicación en el barco de los elementos que componen el sistema de propulsión. Además, también dispone de un conjunto de baterías de gel encargadas de almacenar la energía en exceso generada por las pilas de combustible en los momentos de baja demanda, para entregarla en los momentos puntuales en que la propulsión de la embarcación demanda un extra de potencia. En la figura 4.21, se puede ver un esquema del funcionamiento de este sistema híbrido de pila de combustible. Para el almacenaje del combustible, emplea 12 tanques con 50 kg de hidrógeno comprimido a 350 bar, que proporcionan una autonomía de funcionamiento de tres días.

En el año 2008, los ingenieros de la Universidad de Birmingham desarrollaron un barco (figura 4.22), en el marco del proyecto PROTIUM, para navegar en canales impulsado por un motor híbrido con tecnología de pila de combustible, sustituyendo al motor diesel. El sistema de

propulsión combina una pila de combustible tipo PEM de 5kW, una batería y un motor eléctrico basado en un imán permanente (NdFeB).

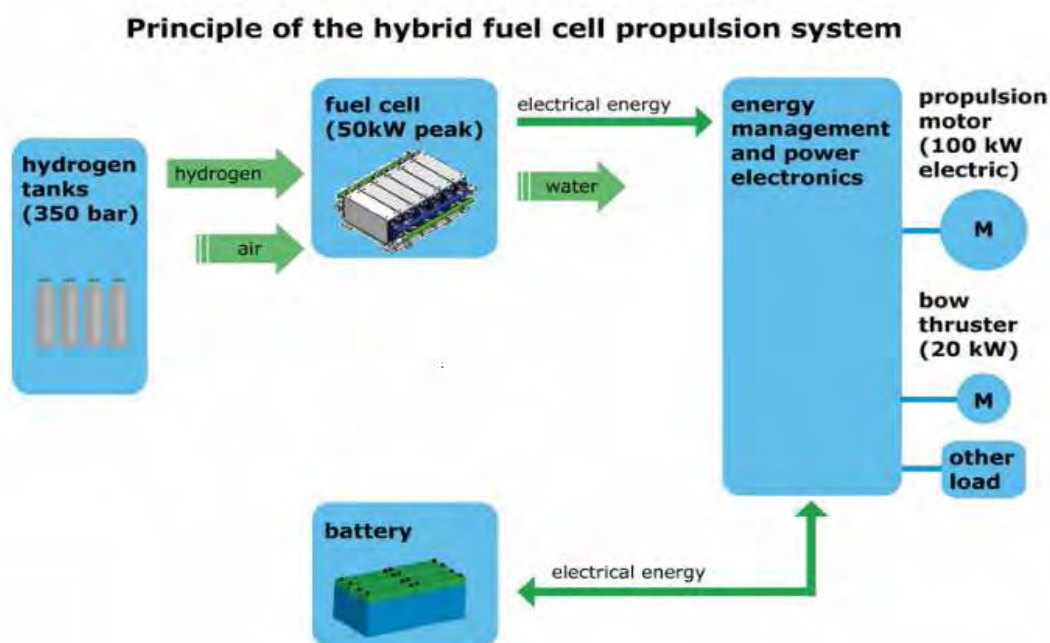


Figura 4.21.- Esquema de funcionamiento del sistema híbrido del Zemships.

La novedad de este proyecto, con respecto a otros que emplean pila de combustible PEM, radica en el almacenamiento del hidrógeno (figura 4.23), que en este caso se realiza en estado sólido como un hidruro metálico. Este hidruro metálico es una aleación de Ti-V-Mn-Fe, con un peso de de 133 kg, capaz de albergar aproximadamente 2.5kg de hidrógeno a 10 bar (28 m³ a presión y temperatura estándar) cuando está completamente cargado. Para la liberación del hidrógeno, se desciende la presión. El barco dispone de 5 unidades de almacenamiento y en cada una de ellas, el hidruro metálico en polvo está contenido en 7 tubos de acero inoxidable, rodeados de un encamisado con agua cuya misión es proporcionar calor cuando el hidrógeno se está desorbiendo y enfriar, en la etapa de almacenamiento. La temperatura se mantiene gracias a una bomba de agua y un intercambiador de calor. La ventaja de este sistema de almacenamiento, es la baja presión requerida (inferior a 10 bar) y que las 5 unidades de almacenamiento, tienen una capacidad equivalente a 4 cilindros estándar de hidrógeno gas comprimido a 200 bar.

En abril de 2009, surco por primera vez los canales de Venecia, una embarcación de 7 metros de eslora propulsada por dos pilas de combustible PEM de 5 kW, desarrollado por "Venezia Tecnología" en colaboración con la Empresa Energética Italiana ENI y co-financiado por el Ministerio italiano de Medio Ambiente.

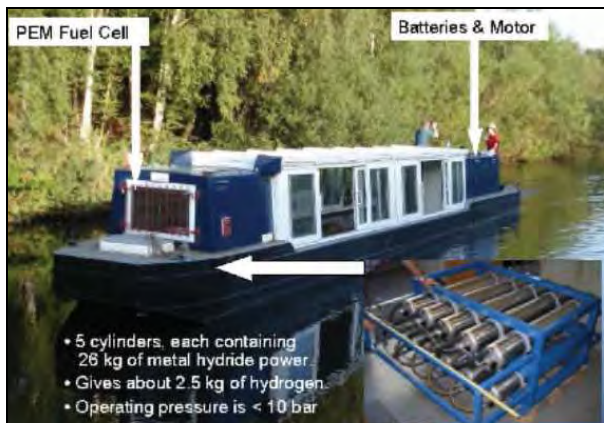


Figura 4.22.- Barco del proyecto PROTIUM de la Universidad de Birmingham

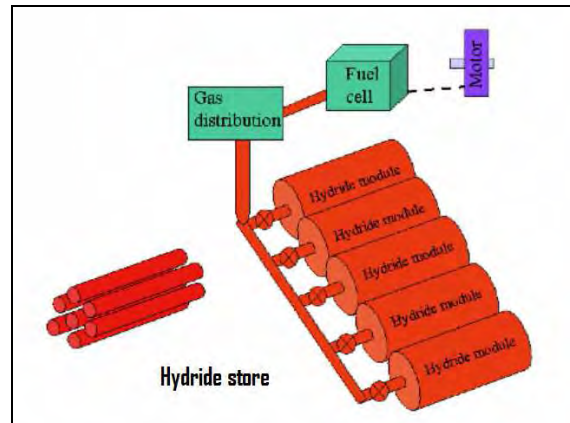


Figura 4.23.- Dispositivo de almacenamiento del hidrógeno en estado sólido como un hidruro metálico.

En diciembre de 2009, se puso en funcionamiento en los canales de Ámsterdam el “Nemo H2” (figura 4.24), con 18 metros de eslora y capacidad para 87 pasajeros. La energía para la propulsión de los acimut (hélice que puede orientar su impulso girando alrededor de un eje vertical) se obtiene de una pila de combustible PEM de hidrógeno que proporciona entre 60 y 70 kW, complementada con un conjunto de baterías que entregan entre 30 y 50 kW. Para la mejora de la maniobrabilidad dispone de una hélice de proa accionada por un motor eléctrico de 11 kW. El Hidrógeno se almacena en 6 tanques, con capacidad para 24 kg de hidrógeno a 350 bar. Con esto, consigue una autonomía de nueve horas navegando a nueve nudos, lo que supone una autonomía de un día, frente a los siete días de las embarcaciones con propulsión convencional. La incorporación de este tipo de tecnología con cero emisiones de CO₂, es muy importante en una ciudad como esta, donde las embarcaciones realizan un promedio de 125 viajes al día.

Entre el año 2008 y el 2012 el aventurero profesional Mike Horn realizó en velero, el “Pangaea” un viaje alrededor del mundo, que comenzó en Punta Arenas, en Chile, siendo el primer gran destino Cabo de Hornos, seguido por la Antártica y pasando por Australia y Asia, hasta alcanzar el Ártico, para regresar a América, y terminar en Punta Arenas. Este viaje denominado Expedición Pangaea, presentaba la particularidad de realizarse en un velero, cuyo diseño estaba basado en la construcción de un barco duradero y resistente capaz de atravesar el mundo con un impacto ecológico mínimo. Este velero, aunque empleaba las velas para la mayoría de su propulsión, llevaba una pila de combustible de hidrógeno para aumentar la potencia durante la navegación por las aguas heladas del Ártico. Para obtener el hidrógeno para la alimentación de la pila de combustible, estaba equipado con unos paneles solares, que mediante un proceso de electrólisis separaban el agua en oxígeno, e hidrógeno, almacenando este último, para ser empleado en la pila de combustible.

En España, también se trabaja en varios proyectos de aplicación de pilas de combustible a embarcaciones. En las aguas del pantano de La Cuerda, en Vinuesa (Soria), encontramos un barco eléctrico híbrido (figura 4.25) alimentado con pila de combustible y energía solar fotovoltaica (paneles fotovoltaicos). De este modo se consigue aumentar la autonomía de la embarcación en un 150% y se le dota de una seguridad en el suministro de energía.



Figura 4.24.- "Nemo H2", con propulsión pila PEM en funcionamiento en los canales de Ámsterdam.



Figura 4.25.- Barco eléctrico con propulsión híbrida en el pantano de la Cuera (Cuenca).

En septiembre del 2011, se ha presentado un proyecto en la Universidad de Ingeniería Técnica Nával en Servicios y Propulsión de Barcelona, que propone la incorporación de dos stacks de pila de combustible tipo PEM del fabricante Ballard, en una embarcación con una eslora de 22.53 m y capacidad para 183 pasajeros.

Se trata de la golondrina Encarnación, una embarcación propulsada por un Motor Diesel 4T 8 cilindros en V Marca Baudouin que desarrolla una potencia 191,18 kW (260 CV). La pila de combustible propuesta proporciona una potencia de 200kW, con una tensión de salida de 900V y un peso por módulo de 330kg. El almacenamiento del hidrógeno, se realiza en 8 botellas con una capacidad de 205 litros cada una y a una presión de 350 bar.

Además, el proyecto también incluye el diseño de una hidrogenera para el abastecimiento de la embarcación, que emplearía la energía solar como fuente de energía renovable para producir el hidrógeno.

Entre agosto del 2010 y septiembre del 2012, Energylab desarrollo un proyecto, junto con la Xunta de Galicia, para la instalación de un sistema de propulsión eléctrico mediante el empleo de un motor de jaula de ardilla de 132 kW, en un buque de pesca de bajura. El motor eléctrico instalado en este pesquero está alimentado desde un conjunto de baterías y una pila de hidrógeno.

Se escogió para la aplicación de este sistema, el buque “Gaivotiña” utilizado para tareas auxiliares por el servicio de Guardacostas de Galicia. Se trata de un modelo de pesca estándar representativo de la flota de bajura de 12 m de eslora.

El sector pesquero, como el resto de sectores marítimos, al ser consumidores de gasóleo van a ser uno de los frentes sobre los que se va a actuar para frenar el calentamiento global. El problema medioambiental unido al continuo crecimiento del precio del crudo, hace necesario conseguir un mayor ahorro energético, lo que se traduce en el desarrollo de nuevas tecnologías y combustibles para su introducción en el sector.

En este aspecto, el gobierno de Islandia está llevando a cabo un ambicioso programa para eliminar su dependencia de los recursos energéticos fósiles y convertirse en una economía del hidrógeno para el periodo entre 2030 y 2040. Dentro de los muchos campos de acción, uno de ellos es la sustitución de la flota pesquera por barcos impulsados por pilas de hidrógeno.

Es importante destacar, el último descubrimiento realizado por un grupo de investigadores de la Universidad de Denver, que han conseguido dar un paso muy importante en lo que a transporte utilizando hidrógeno como combustible se refiere, al haber descubierto un sistema mediante el cual se puede producir hidrógeno al tiempo que se genera electricidad y se desala agua. Este proyecto comenzó en el año 2009 y los frutos de la investigación son ciertamente útiles, ya que por todos es sabido, que la gran mayoría de las mercancías que se transportan en la actualidad de un lugar a otro del mundo se mueven por mar. Con este sistema, Por este motivo, los barcos podrían recoger agua de mar y convertirla en electricidad, que les permitiría desplazarse, al tiempo que generan agua desalada que pueden emplear para los servicios del barco. Además este sistema daría autonomía ilimitada a las embarcaciones. De momento es un proyecto en el que se está trabajando a pequeña escala, esperemos que llegue algún día a niveles superiores.

Capítulo 5: Banco de Pruebas del Laboratorio: Diseño y Construcción.

Para realizar el estudio en el laboratorio de la Pila de combustible antes de su implantación en la embarcación, ha sido necesario diseñar y posteriormente construir un Banco de pruebas. Todo el diseño del Banco de pruebas, se desarrollo partir de la pila de combustible seleccionada. La primera labor, consistió en realizar un estudio de las pilas tipo PEM existentes en el mercado para aplicaciones móviles, como es nuestro caso. Estas pilas abarcan intervalos de potencia entre 1-250 KW. Entre los principales distribuidores de esta tecnología encontramos empresas como:

- Heliocentris.
- Nuvera.
- Ballard
- Proton Motor.
- United Technologies Company (UTC).
- Nedstack.

Para los requerimientos energéticos de nuestro banco de pruebas de propulsión y consumos auxiliares marítimos, se seleccionó la pila de combustible PEM NEXA Power Module de la empresa alemana HELIOCENTRIX. El módulo NEXA proporciona hasta 1200 W de corriente eléctrica continua (DC) sin regular a un voltaje nominal de salida de 26 VDC. Está constituido por el stack de la empresa canadiense BALLARD, así como de aquellos equipos auxiliares necesarios para el funcionamiento de la pila de combustible.

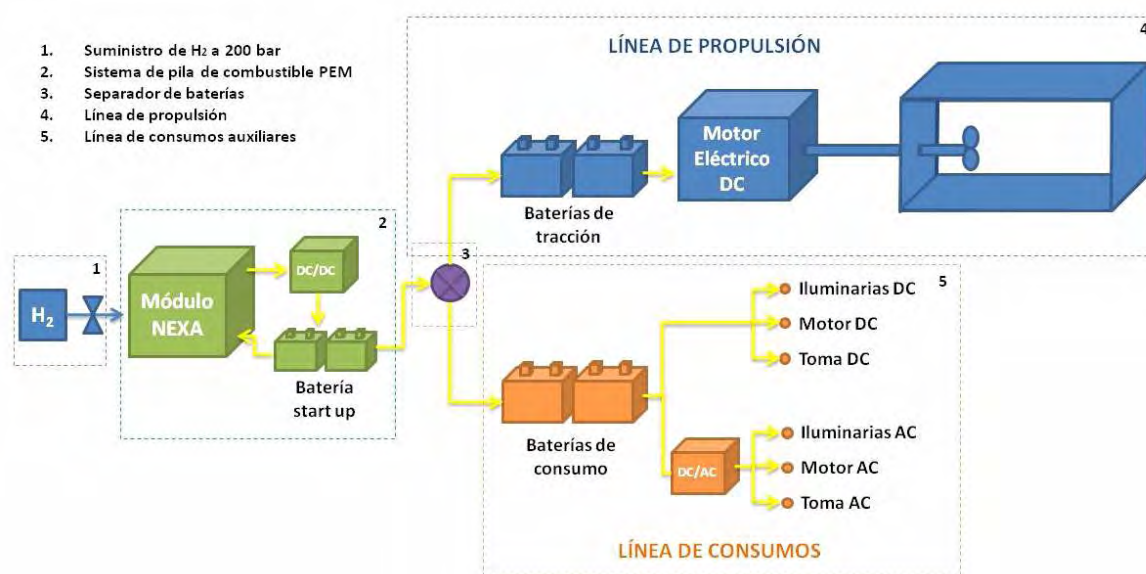


Figura 5.1.- Estructura del Banco de Ensayos.

La solución adoptada para crear el banco de ensayos consta de cinco bloques: El sistema para el almacenamiento de hidrógeno, la pila de combustible, el convertidor DC/DC, la línea de consumos y la línea de propulsión, formada esta última por el motor eléctrico de propulsión, la hélice y el tanque de agua donde va a trabajar esta. En la figura 5.1 se muestra, mediante un diagrama de bloques, la estructura seguida en la construcción del Banco de Pruebas. Se puede ver como la pila PEM de combustible alimentada con hidrógeno, genera una corriente eléctrica continua, que una vez estabilizada, se distribuye a través de un repartidor de corriente en dos líneas, una de propulsión y otra de consumos auxiliares.

A continuación, se explica detalladamente uno a uno, los bloques que constituyen el Banco de ensayos creado para las pruebas en el laboratorio.

5.1.- SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO.

Para el sistema de almacenamiento de hidrógeno, se han seleccionado dos botellas de hidrógeno de uso comercial, suministradas por la empresa Praxair. Cada botella contiene 50 litros de hidrógeno comprimido a 200 bar de calidad "Fuel Cell" (8.8 Nm^3) y el peso de cada botella es de 86 kg. Las botellas de hidrógeno, trabajan una en operación y la otra en modo de reserva.

Dado que el módulo NEXA se alimenta con hidrógeno de una pureza del 99.99% y en un intervalo de presiones comprendido entre el 0.7 y 17 bar, es necesario un sistema de regulación de presión para reducir la misma hasta los intervalos de alimentación del módulo NEXA.



Figura 5.2.- Caseta para el almacenaje de las botellas de hidrógeno



Figura 5.3.- Panel de conexión de las botellas de H_2

Debido a la normativa de seguridad vigente en el empleo de hidrogeno en estado gaseoso como combustible, fue necesario crear un local en el exterior del laboratorio, donde tener estibadas las dos botellas. Este local exterior consiste en una caseta de metal cerrada y señalizada (figura 5.2), donde van fijadas la botellas e impide la manipulación de las mismas, a la vez que incorpora un panel con los manómetros, un regulador de presión, una purga y un repartidor (figura 5.3), que nos permite emplear una u otra botella. Desde esta caseta, se realizó la canalización del hidrógeno hasta el interior y se colocó un puesto de mando al lado de la pila con un manómetro que permite abrir y cerrar desde el interior el suministro de hidrógeno y controlar la presión de entrada. La conexión entre el puesto de mando y el módulo NEXA se realizó con un latiguillo flexible. Para tener suministro de hidrógeno en el laboratorio, es necesario abrir dos llaves de paso, una situada en la caseta exterior y la otra en el interior, previa a la alimentación de la pila.

5.2.- LA PILA DE COMBUSTIBLE PEM NEXA.

El sistema empleado para la generación de corriente eléctrica empleando como combustible el hidrógeno, esta constituido por la pila de combustible PEM NEXA, capaz de proporcionar hasta 1200 W de corriente eléctrica continua (DC) sin regular, a un voltaje nominal de salida de 26 VDC. Está constituido por el stack de BALLARD, así como aquellos equipos auxiliares necesarios para el funcionamiento de la pila de combustible. En la figura 5.4, se puede ver el esquema de funcionamiento del módulo NEXA.

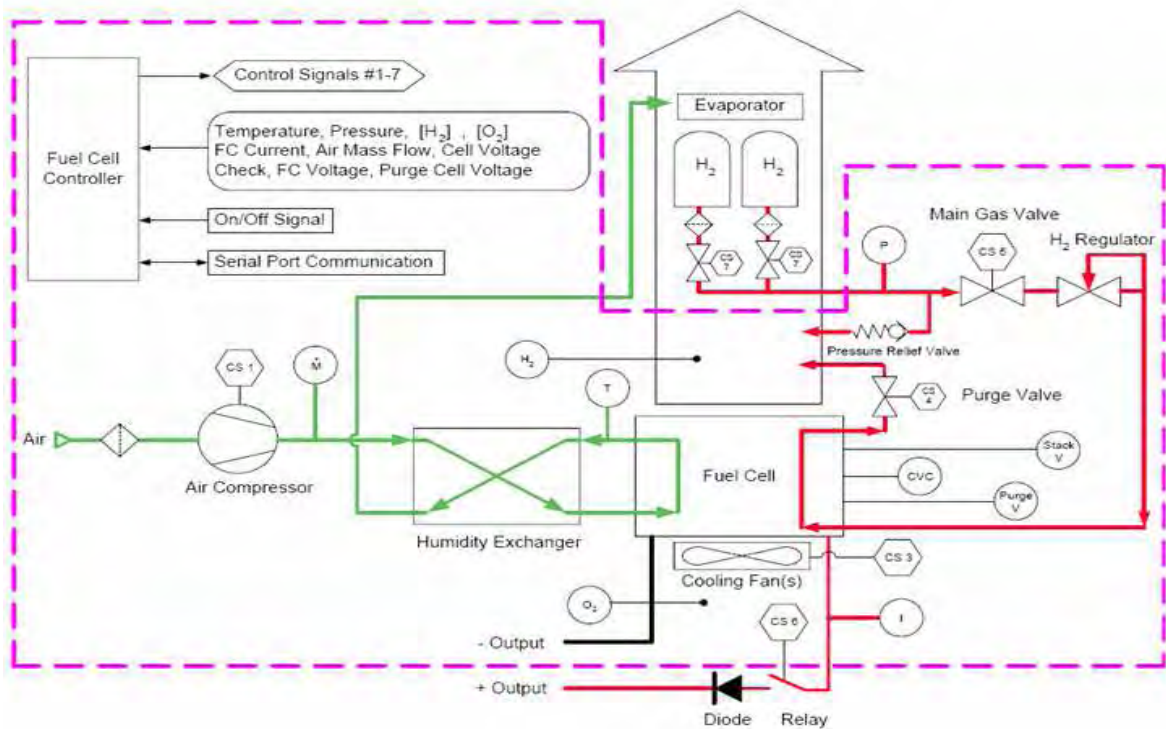


Figura 5.4.- Esquema de funcionamiento del módulo NEXA.

5.2.1.- Componentes y sistemas del módulo de Pila Nexa.

Stack de pila de combustible NEXA.

El stack de la pila de combustible genera 1,2 kW de potencia neta. El voltaje de salida varía con la potencia, entregando un máximo de 43 V cuando se encuentra a carga cero y 26 V cuando esta a plena carga. Durante la operación del sistema, el voltaje del stack se monitoriza por motivos de diagnóstico, control y seguridad. Mediante un sistema de chequeo del voltaje de las celdas (CVC) se monitoriza continuamente el comportamiento de cada celda individual, de manera que si se produce un fallo en una celda se apagará el sistema de la pila NEXA.

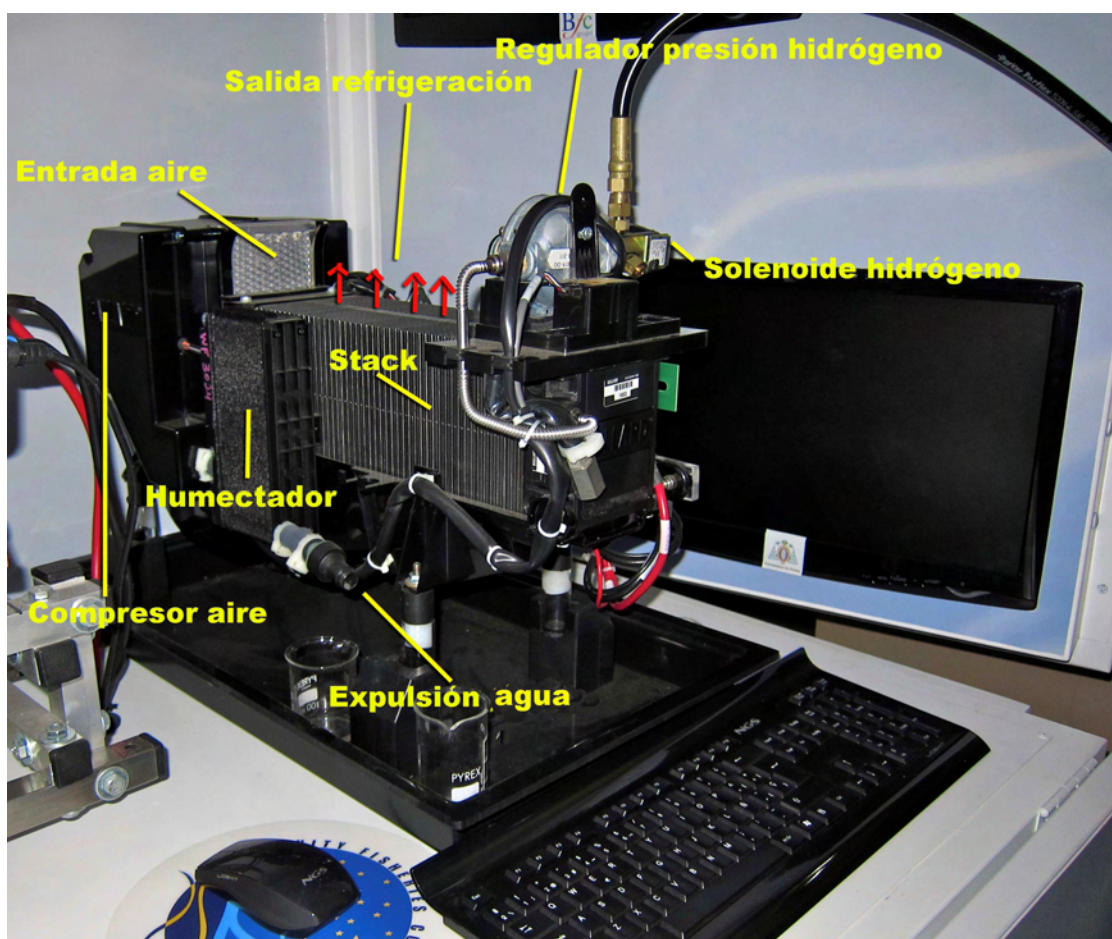


Figura 5.5.- Componentes y sistemas del módulo de Pila NEXA.

Sistema de hidrógeno.

El hidrógeno que alimenta el módulo NEXA presenta una pureza del 99.99% y trabaja en un rango de presiones que oscila entre los 0,7 y los 17 bar. El sistema de suministro de hidrógeno (figura 5.6) monitoriza y regula el suministro de hidrógeno al stack y está compuesto por los siguientes componentes:

- Transductor o sensor de presión que monitoriza las condiciones del suministro de hidrógeno para garantizar un adecuado suministro de combustible
- Válvula de alivio de presión que protege a los componentes aguas bajo de sobrepresiones.
- Válvula de solenoide para aislar al módulo del suministro de hidrógeno durante los apagados del sistema.
- Regulador de presión para mantener la presión de suministro adecuada.
- Detectores de fugas de hidrógeno.

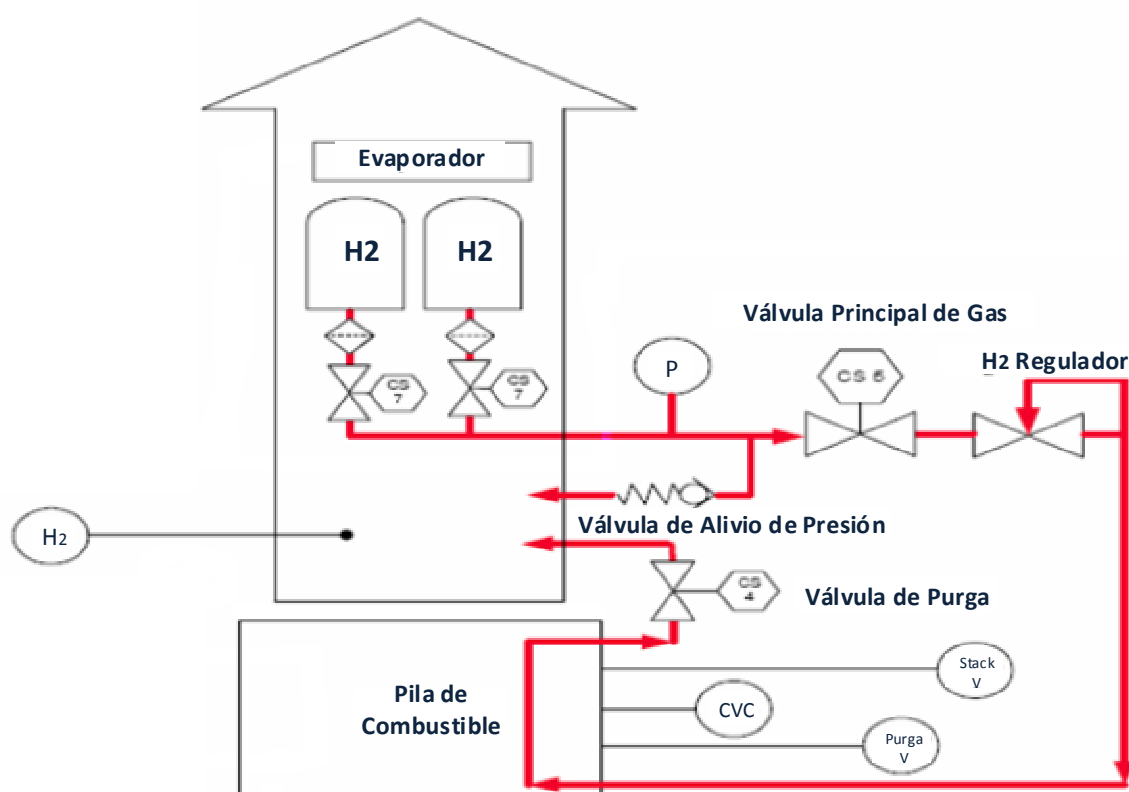


Figura 5.6.- Sistema de suministro de hidrógeno.

El stack de la pila está presurizado con hidrógeno durante la operación. El regulador ensamblado repone continuamente hidrógeno a medida que es consumido por la reacción de las celdas. Durante la reacción electroquímica en el stack, el nitrógeno del aire y el agua producida migra poco a poco a través de la membrana y progresivamente se va acumulando en ciertas celdas, denominadas celdas de purga, disminuyendo el rendimiento global del sistema. Cuando el voltaje del sistema disminuye de un voltaje de purga fijado, una válvula de purga libera hidrógeno para eliminar estos inertes y recuperar la eficiencia del sistema. Este hidrógeno purgado es descargado en la corriente de aire de refrigeración antes de abandonar el sistema y representa menos de un 1% del consumo de hidrógeno.

Para garantizar la seguridad cuando operamos con el módulo NEXA en espacios cerrados, el hidrógeno purgado en la corriente de aire, es diluido a niveles bastante inferiores al límite inferior de inflamabilidad. Para garantizar esto, se dispone de un detector de fugas de hidrógeno situado en el escape de la corriente de aire de refrigeración. De tal manera que si la concentración de hidrógeno alcanza el 25% del límite inferior de inflamabilidad (es del 4% en volumen para el H₂) el sistema de control genera una señal de alarma.

Sistema de Aire.

Para proporcionar al stack de la pila el exceso de aire en función a los requerimientos de la reacción, se dispone de un pequeño compresor. El aire aspirado por este debe atravesar un filtro que protege al compresor y a los componentes aguas abajo de partículas arrastradas por el aire. Además, mediante un sensor que mide el flujo de aire, se ajusta la velocidad del compresor para adaptarse a la corriente de demanda del stack. En la figura 5.7 se puede ver el esquema del proceso empleado para el suministro de aire.

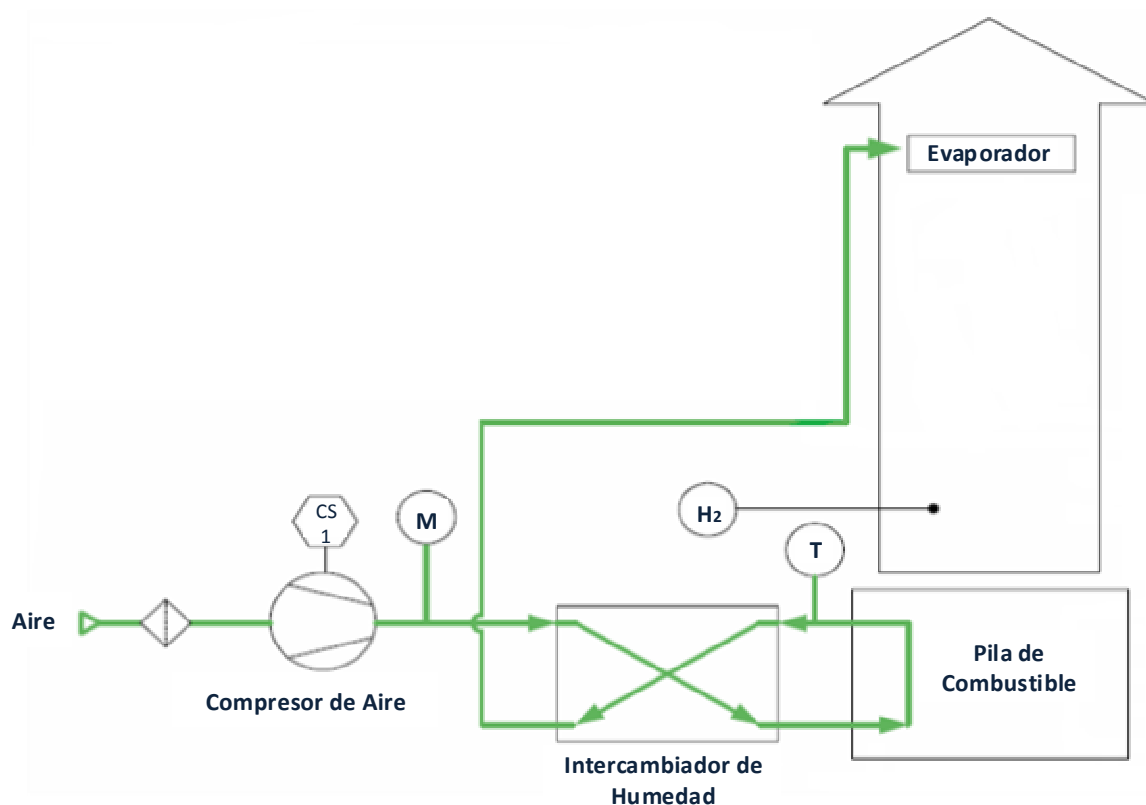


Figura 5.7.- Sistema para el suministro de aire.

Para mantener la saturación de la membrana y prolongar la vida útil de la pila el aire es además de filtrado, humidificado antes de alcanzar las celdas del stack. El exceso de agua producida, es descargada del sistema, en estado líquido y como vapor, por el escape de aire. Alternativamente, el agua producida puede ser drenada y recogida.

Sistema de Refrigeración.

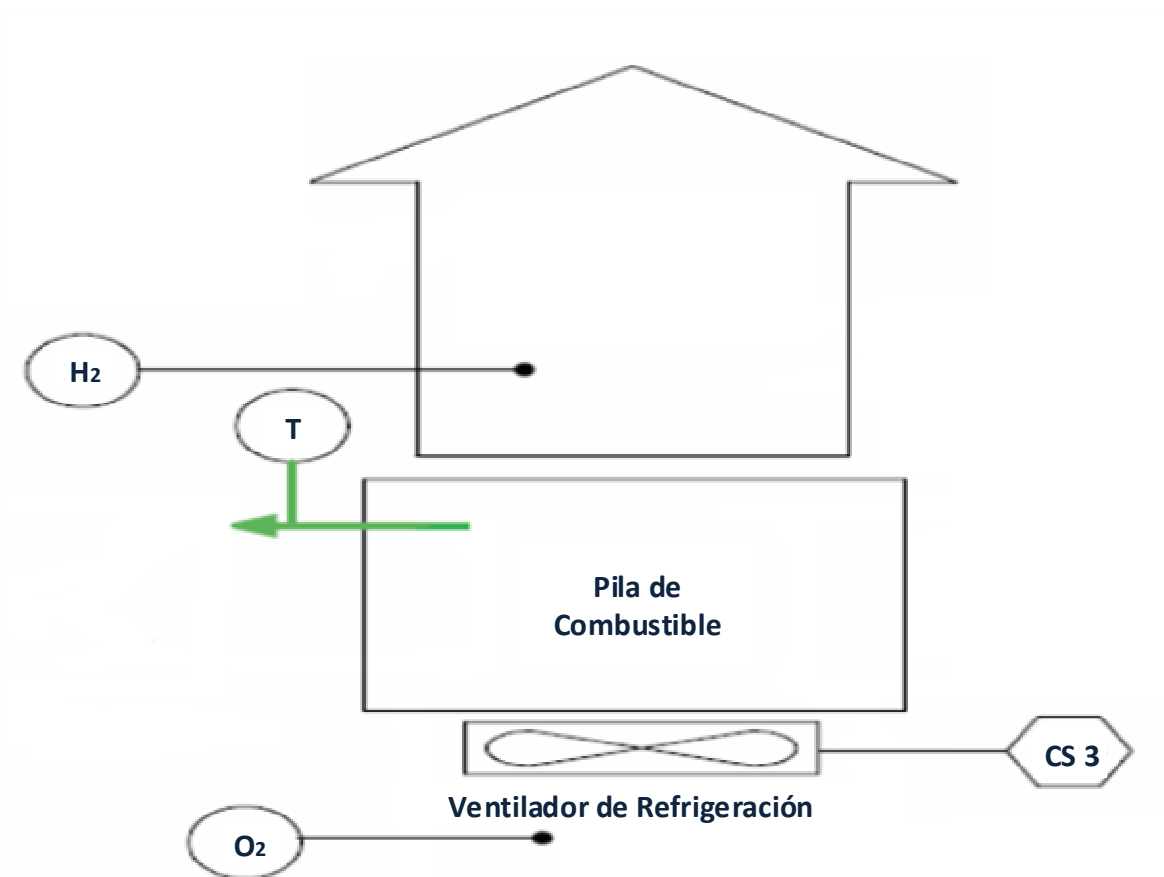


Figura 5.8.- Sistema de refrigeración.

La refrigeración del módulo Nexa se realiza con aire mediante el empleo de un ventilador, este se encuentra localizado en la base de la unidad, e impulsa el aire a través de canales verticales de ventilación del stack. La velocidad del ventilador depende de la temperatura del stack que se mide a la salida del aire en el cátodo. De este modo, la temperatura de operación de la pila se mantiene a unos 65°C. En la figura 5.8 se representa el funcionamiento del sistema de refrigeración.

Sistema Electrónico de Control.

La operación del sistema Nexa está automatizada por un sistema de control electrónico. El tablero de control recibe varias señales desde los sensores colocados en el sistema. En la tabla 5.1. se pueden ver las variables controladas por el sistema de control del módulo NEXA.

Mediante el empleo del tablero de control, se emiten señales de salida digitales y analógicas que nos permiten regular el funcionamiento del sistema. Los comandos de control son emitidos para abrir y cerrar la válvula solenoide de hidrógeno y la válvula de purga del módulo

Nexa. El sistema de control siempre emite una señal para cerrar la válvula solenoide y aislar los tanques de almacenamiento de hidrógeno cuando el módulo Nexa no está operando. El sistema de control también se encarga de variar la velocidad del compresor de aire y del ventilador de refrigeración, en función de la corriente de demanda y de la temperatura del stack, respectivamente.

SEÑALES DE ENTRADA	SEÑALES DE SALIDA
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura del stack ▪ Presión del hidrógeno ▪ Concentración del hidrógeno liberado ▪ Corriente del stack ▪ Flujo másico de aire ▪ Voltaje del stack ▪ Voltaje de purga de celda ▪ Concentración de oxígeno 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Válvula solenoide de hidrógeno ▪ Válvula de purga de hidrógeno ▪ Velocidad del compresor de aire ▪ Velocidad del ventilador ▪ Relé de carga externo

Tabla 5.1.- Variables controladas por el sistema de control del módulo NEXA

Durante el funcionamiento, pueden darse condiciones de funcionamiento inusuales o inseguras. Cuando esto sucede aparecerán dependiendo de la severidad.

- Avisos (“warning”). Durante estos, el módulo Nexa continúa operando y el controlador intenta remediar la situación
- Alarmas. Si se produce una alarma, el controlador inicia una secuencia de apagado. En la mayoría de los casos, después de una alarma y su apagado el sistema puede ser “reseteado”, aunque por razones de seguridad algunas de estas alarmas, como en el caso de la alarma por fugas de hidrógeno, se requieren los Servicios de Ballard para ser “reseteadas”.
- Apagados automáticos del sistema.

5.2.2.- Funcionamiento del módulo de Pila Nexa.

El módulo de pila NEXA suministra en función de la demanda, corriente eléctrica continua sin estabilizar, esto lo realiza de forma totalmente automatizada dando respuesta a las variaciones de carga .

Para poner en funcionamiento el módulo Nexa, es necesario la conexión del mismo a una batería de 24 V para asumir los requerimientos energéticos de arranque y parada de este; así como un suministro de hidrógeno adecuado y una señal de 5 V para el arranque del panel de control. Una vez conectada la batería de 24 V, el módulo Nexa pasa a un estado de Standby. En este transmite información del sistema y mensajes de su estado. En el estado de Standby, la aplicación de la señal de 5 V hará comenzar la secuencia de arranque (starting, en inglés). La válvula solenoide de hidrógeno se abre y la de purga hace ciclos periódicamente. Así mismo, la

bomba de aire se enciende para proporcionar aire a las celdas. Finalmente, el ventilador de refrigeración se enciende para proporcionar la regulación térmica así como la dilución del hidrógeno purgado.

Durante esta secuencia, la tensión del stack de la pila se incrementa rápidamente desde cero hasta los niveles normales de ralentí. Una vez se han realizado una serie de chequeos internos del sistema, la pila pasa del estado de arranque al de funcionamiento (de starting a running state). Este proceso puede durar entre 10 y 30 segundos (en la práctica algo más, en torno al minuto).

Una vez alcanzado el estado de funcionamiento ("running state"), el controlador del módulo Nexa transfiere las cargas parasitarias desde la batería externa al stack de la pila y un relé externo de carga envía una señal de control para conectar el stack de la pila a la carga externa. Es en este momento cuando se puede comenzar a extraer la energía desde el módulo Nexa.

La secuencia de apagado normal del módulo Nexa dura aproximadamente unos 45 segundos. Para realizar este, debemos eliminar del módulo de energía la señal de inicio de 5 V. De esta manera, se produce la transición al estado de apagado normal (normal shut down state). El relé de carga externa se abre para aislar la carga del stack de la pila y el controlador interno transfiere las cargas parasitarias desde el stack de la pila hacia la batería externa. Si el módulo Nexa ha estado operando más allá de unos 60 segundos, durante la secuencia de apagado se eliminará el agua producida usando la bomba de aire y la válvula de purga de hidrógeno.

Mantenimiento de la Pila.

Para poder mantener el máximo rendimiento de la pila y evitar las pérdidas de rendimiento debidas a periodos de inactividad de la misma, se hace necesario realizar la puesta en marcha del sistema cada 2 o 3 meses. El módulo ha de operar a media carga entre 10 y 30 minutos (la potencia medida al menos durante 10 minutos debe exceder los 200 W). Si se diera el caso, el propio sistema automáticamente ejecutará el proceso de recuperación prolongando la secuencia de apagado. Esta prolongación podría durar aproximadamente 4 minutos.

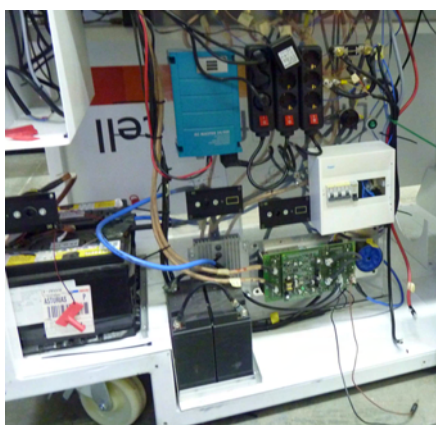
Cuando la pila esta almacenada o sin operar durante periodos superiores a los dos o tres meses, se produce una pérdida de rendimiento, que se manifiesta por una reducción de la tensión y de la potencia de salida. El rendimiento disminuye a medida que la duración del almacenamiento es mayor, con un descenso aproximado del 10% durante un año. Si se almacena en locales sometida a elevadas temperaturas, estas aceleran aún más la disminución del rendimiento. En casos extremos, el módulo Nexa podría no ser capaz de arrancar debido a que los valores permisivos de puesta en marcha no son alcanzados.

No obstante, las pérdidas de rendimiento que se puedan producir durante el almacenamiento son reversibles a través de la operación de la pila. La empresa Ballard ha desarrollado un sistema automatizado que prolonga la secuencia de apagado de la pila añadiendo intervalos específicos de mantenimiento, los cuales incorporan procesos automatizados para rejuvenecer la pila y así compensar las pérdidas de rendimiento por los periodos de almacenamiento.

Protocolo de arranque de la Pila Nexa.

1º.- Se realizarán las conexiones en la parte posterior del Banco de ensayos (Fig.5.9):

- a. Conectar el negativo. (Enroscar el tornillo del cortacorriente).
- b. Conectar el conjunto de las baterías (Se conectaran girando 90º las 4 llaves)
- c. Conectar los automáticos del cuadro.
 - Este cuadro alimenta al inverter: AC MASTER 24V/500W.
 - De izq. a dcha. => Alimenta las tres regletas en ese orden.
- d. Accionar los interruptores de las tres regletas.
- e. Accionar el interruptor del inverter AC MASTER. (Situado en su base).



Situación de las baterías. (Parte posterior del Banco de ensayos)			
			B1 BATERÍAS DE PROPULSIÓN.
B2 BATERÍAS AUXILIARES.	BATERÍAS DE CARGA DE LA PILA NEXA	REGULADOR DE LAS BATERÍAS DE ALIMENTACIÓN	

Figura 5.9.- Vista posterior del banco de ensayos.

2º.- En la parte frontal del Banco de ensayos, en el panel de control debemos:

- a. En el panel gestor de potencia (figura 5.10): Habilitar los cuatro interruptores superiores de la derecha.



Figura.5.10.- Panel gestor de Potencia.

- b. Encender el ordenador y las pantallas.

3º.- Abrir el hidrógeno:

- a. En la parte exterior de la nave en la caseta donde se encuentran las dos botellas de hidrógeno, abrir las dos llaves de la botella que vayamos a poner en activo.
- b. En el Banco de ensayos, debemos abrir la llave que da paso al hidrógeno y controlar que el manómetro este en torno a 2.5 Bar (sino es así, se debe regular la presión).

4º.- **IMPORTANTE:** El Software de la Pila NEXA debe encenderse antes de proceder al arranque de la pila Nexa.

- a. En la pantalla del ordenador, debemos abrir la ventana: NexaMon OEM. En la parte inferior derecha de la pantalla, debemos activar COM1 = ON (Nos conecta la pila al ordenador, la señal a la salida de la pila es 488 y la que lee el ordenador es 232, por eso debemos incorporar un adaptador intermedio)
- b. Encender el software del Regulador: Regulador DC/DC => Projvis 0.2 (Asegurarnos que en la configuración se encuentre conectado al puerto COM 1. En este caso la señal de salida es 232, la misma que lee el ordenador)

5º.- Desbloquear la seta de parada de emergencia (Figura 5.11).

6º.- En el Panel de control se encuentra situado el display (Figura 5.11) denominado ISLE. Debemos pulsar el botón "SYSTEM - ON".



Figura.5.11.- Display y Seta de parada de emergencia.

7.- En el Panel de Gestión, accionar en primer lugar el interruptor “PEM” que habilita las conexiones con la Pila.

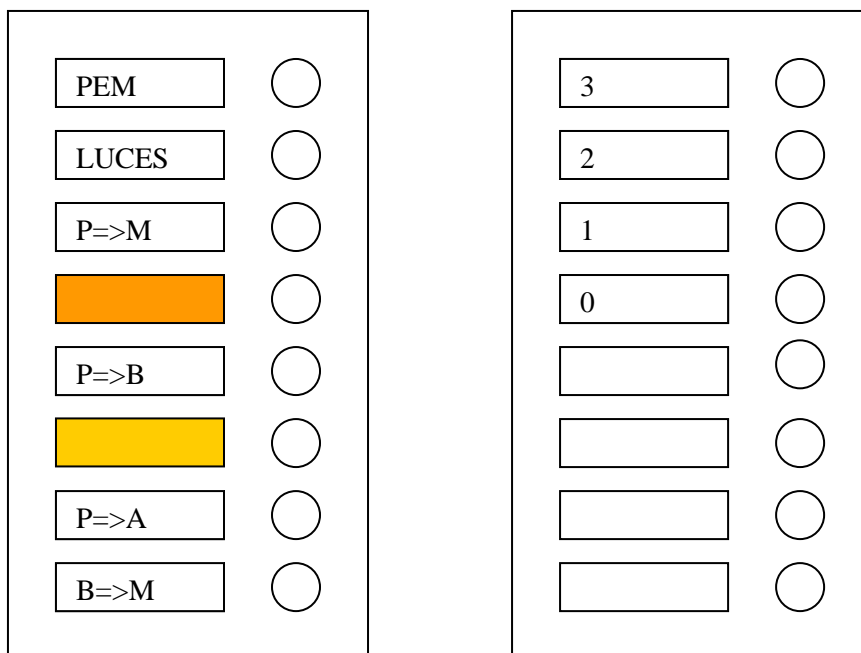


Figura.5.12.- Esquema del Panel gestor de Potencia.

- a. $P \Rightarrow M$: Conecta la pila al motor.
- b. $P \Rightarrow B$: Conecta la pila a las baterías de propulsión (B1)
- c. $P \Rightarrow A$: Conecta la pila a las baterías auxiliares (B2)
- d. $B \Rightarrow M$: Conecta las baterías el motor. (Sistema de seguridad, por si se debe cambiar una botella de Hidrógeno o para obtener más potencia en el motor (El motor es de 2KW y la pila da 1.2 KW)

Protocolo de parada de la Pila Nexa:

1º.- Panel de gestión: Apagar todos los interruptores del cuadro izquierdo.

2º.- En el Panel de Control pulsar el botón: “System - OFF”.

- a. Debo esperar a que se apague el diodo.
- b. Durante este periodo de tiempo, la pila realiza un purgado de agua.

3º.- Cerrar el Hidrógeno: Hacemos el proceso inverso al seguido durante el arranque.

4º.- Apagar el ordenador.

- a. Debemos esperar a que se apague antes de continuar con el proceso.
- b. De este modo evitamos que el ordenador se pueda quedar sin alimentación.

5º.- Panel de Gestión: Apagamos los cuatro interruptores del lado derecho (0-1-2-3).

6º.- Conexiones posteriores:

- a. Bajamos los interruptores generales.
- b. Desconectamos en interruptor del invertir AC MASTER.
- c. Desconectamos las baterías.(Mediante las llaves).
- d. Desconectamos el negativo. (Aflojamos el tornillo).

7º.- Accionamos la seta de parada de emergencia.(Como medida de seguridad)

Rendimiento de la Pila

La pila es capaz de generar una potencia neta de salida entre 0 y 1200 W a plena potencia, mientras la corriente neta de salida varía entre los 0 y los 46 A. El voltaje de salida, varía con la carga dependiendo de las características de polarización del stack.

Cuando se produce un cambio en la carga, el stack de la pila de combustible proporciona inmediatamente corriente para soportar esta variación y el flujo de hidrógeno requerido es suministrado automáticamente por el regulador, proporcionando el suficiente combustible para mantener la presión. Sin embargo, para mantener el rendimiento del sistema durante los cambios de carga es vital la respuesta de la bomba de flujo de aire.

Para el módulo NEXA, el voltaje de salida varía entre los 43 V en vacío y los 26 V a plena potencia. El voltaje teórico óptimo de una celda es 1.2 V a cualquier intensidad, pero en la realidad, las celdas alcanzan el voltaje máximo con el circuito abierto, es decir, sin carga. Sin embargo, a medida que aumenta la carga (intensidad), el voltaje cae. Este efecto conocido como polarización, se puede ver representado en el gráfico de la figura 5.9. La línea azul representa la curva de polarización, la cual es debida a factores físicos y químicos que afectan a la reacción electroquímica cuando fluye la corriente eléctrica.

En la figura 5.13, también se representa mediante la línea de color negro la potencia requerida por las cargas parasitarias del sistema, necesaria para el propio funcionamiento del módulo NEXA y que incluye la bomba de aire, el ventilador de refrigeración, sensores y controladores. Esta potencia auxiliar es de aproximadamente 35 W en vacío. Estos requerimientos auxiliares se incrementan con la carga demandada, principalmente por el mayor consumo energético de la bomba de aire y del ventilador. A plena potencia, se requieren 250 W auxiliares.

Existen otras variables del sistema como son el consumo de hidrógeno, la producción de calor o de agua y la curva de eficiencia del sistema que es importante controlar. En la figura 5.14, se muestran las gráficas que representan estas variables.

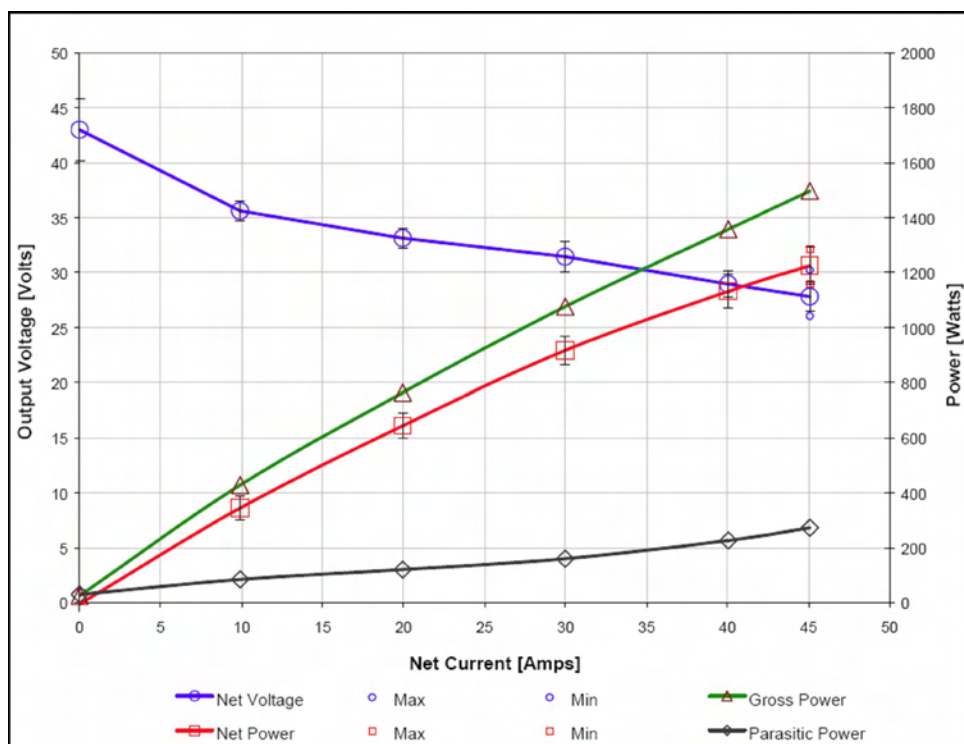


Figura 5.13.- Curvas de Potencia y Polarización.

En la gráfica del Consumo de hidrógeno se aprecia como el consumo de hidrógeno es prácticamente proporcional a la corriente neta de salida entregada y el máximo consumo de combustible a la potencia nominal es de 18,5 slpm (“standard litres per minute”, a 15° C y 1 atm.).

En la gráfica de Producción de calor se muestra la generación de calor en el sistema en función de la corriente y la potencia media neta de salida. A potencia nominal, aproximadamente se generan 1650 W de calor residual. El calor producido se incrementa con el aumento de la carga, así como la tensión y la eficiencia se reducen y las cargas parasitarias aumentan.

En la gráfica de la Curva de eficiencia del sistema se muestra la eficiencia del sistema en función de la corriente y la potencia netas de salida. La eficiencia del sistema a la máxima potencia es de aproximadamente el 38%. La máxima eficiencia del sistema está en torno al 50% y ocurre a una carga parcial de aproximadamente 300 W. La eficiencia del sistema empieza a disminuir para cargas superiores a 300 W, momento en el cual las cargas auxiliares empiezan a requerir más consumo de hidrógeno para su funcionamiento.

En la gráfica de Producción de agua se muestra la producción de agua en el sistema en función de la corriente y la potencia media neta de salida. A potencia nominal se producen 870 ml/h, como vapor y agua líquida. Se puede ver que la producción de agua es prácticamente proporcional a la corriente neta de salida.

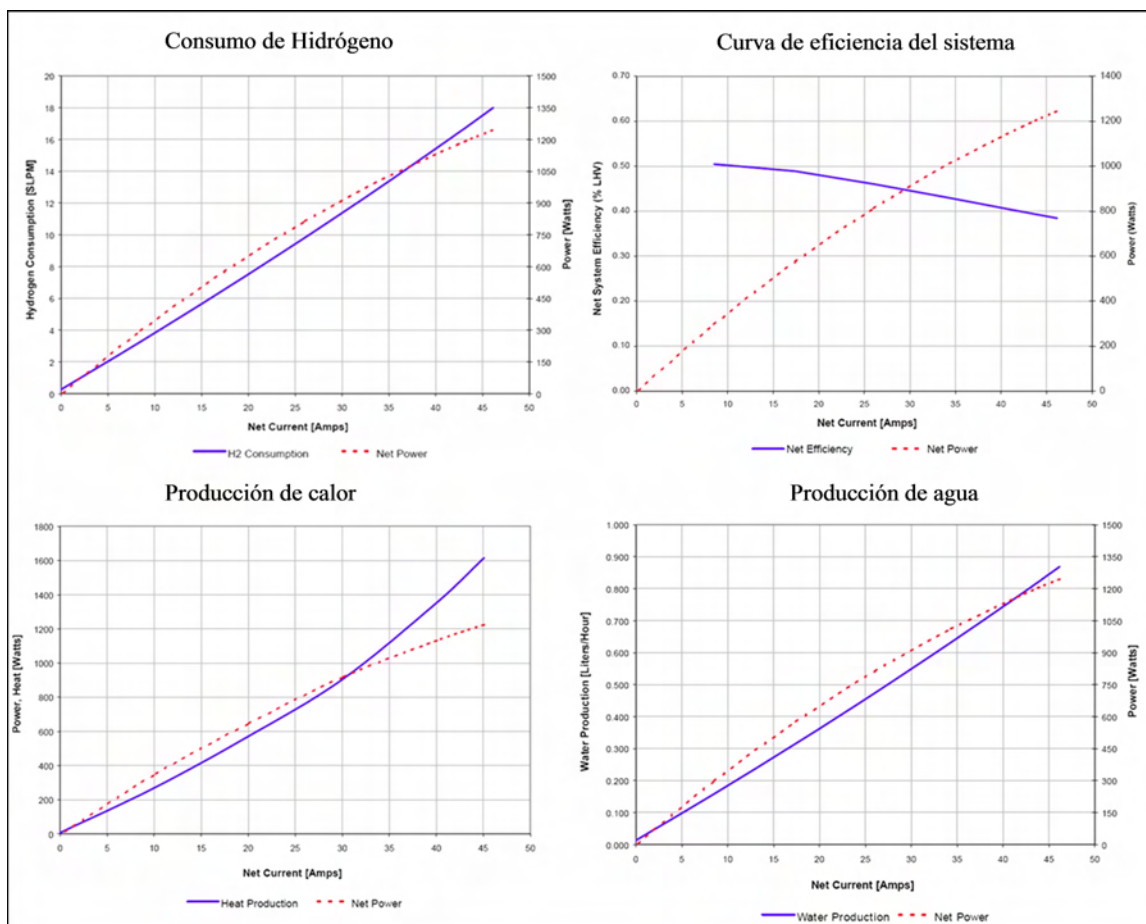


Figura 5.14.- Graficas de variables relacionadas con el rendimiento del módulo Nexa.

5.3.- CONVERTIDOR DC/DC.

Se trata de un convertidor de 24V DC/DC BSZ-PG 1200 con baterías, el cual va conectado al módulo NEXA. Su función es controlar el módulo NEXA y aprovechar la corriente continua no regulada generada por este. El convertidor está compuesto por un “Kit” (figura 5.15) que incluye un microprocesador y software, dos baterías de 12 V cada una, un panel de operaciones con display digital y un adaptador RS232 para la toma de datos. Este kit suministra una corriente regulada a 24V DC que genera la energía necesaria para arrancar el módulo. Además, protege al módulo de posibles contra corrientes de retroceso y regula la operación híbrida con baterías.

El convertidor DC/DC gestiona la carga de las baterías de arranque y controla el módulo NEXA. El sistema puede alimentar los consumos externos a través del conjunto de baterías y el módulo NEXA o empleando únicamente las baterías. Cuando detecta que el voltaje de las baterías decrece de un valor previo fijado, el módulo NEXA carga las baterías al mismo tiempo que suministra energía a la carga externa. La potencia suministrada y el tiempo de operación dependen de la capacidad de las baterías de arranque.

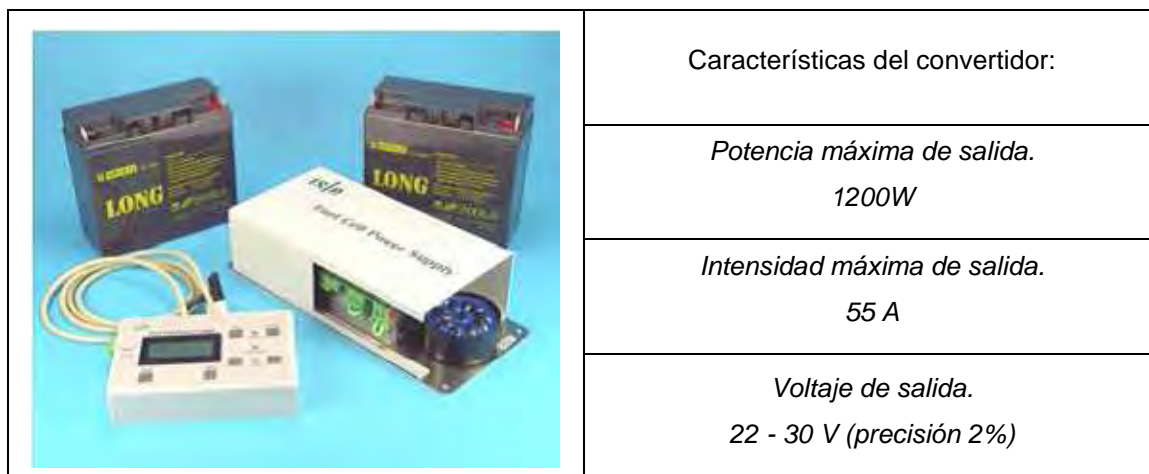


Figura 5.15.- Convertidor de 24V DC/DC BSZ-PG 1200.

El convertidor DC/DC controla la carga de las baterías, fijando el voltaje e intensidad mínimo y máximo y tiempo de carga (V_{ch_Min} , I_{ch_Max} , V_{ch_Max} , I_{Change} , t_{reload}). La figura 5.16 esquematiza como se realizó la conexión de los distintos equipos del sistema de pila de combustible PEM. Como se observa, los consumos externos se conectan entre el terminal negativo del convertidor y el terminal positivo que pasa por un relé. Este relé, se cierra cuando el convertidor DC/DC se conecta, permitiendo que la electricidad salga del sistema para los consumos exteriores. En caso de fallo, el relé se abre y aísla el sistema de pila de combustible. En el momento de arranque del módulo Nexa, este relé se mantiene cerrado, mientras que las baterías de arranque no llegen a un valor establecido de carga, garantizando de este modo energía suficiente para sucesivos arranques.

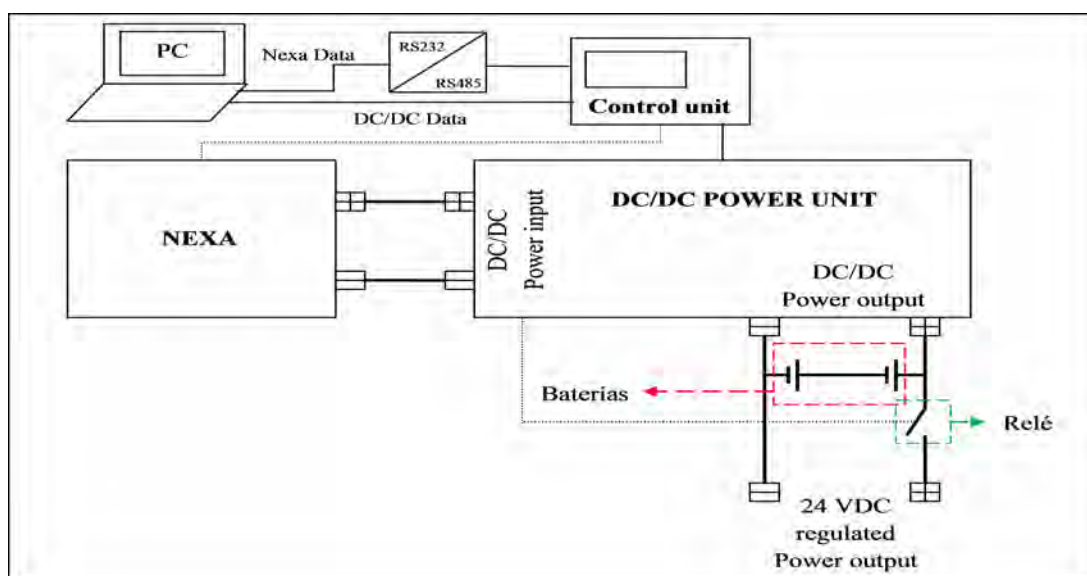


Figura 5.16.- Esquema de conexión del módulo Nexa y el convertidor.

El encendido y apagado del sistema completo de pila de combustible PEM se realiza con el panel de operaciones con display digital (figura 5.17). Además, este panel muestra diferentes parámetros de operación (tabla 5.2) tanto del módulo NEXA como del convertidor DC/DC.

	PARÁMETROS DE OPERACIÓN
Módulo NEXA	Stack (V) Stack (A)
Convertidor DC/DC	V_ Change_min V_ Change_max I_ Change_max I_ Change (Para cargar sus baterías) Reload time Input voltage Battery voltage Battery current

Tabla 5.2.- Valores del Display digital.



Figura 5.17.- Panel de operaciones.

En el panel de operaciones, aparece además del display situado en la parte superior derecha (figura 5.17), un botón para realizar la parada del módulo NEXA en caso de emergencia. Por otro lado, el panel de operaciones permite un control del banco de pruebas centralizado. En él se integraron todos los interruptores, el mando electrónico de regulación de la velocidad del motor, el convertidor DC/AC, el separador de baterías y un medidor de consumo de las baterías de tracción que permite conocer el estado de carga de las baterías.

A través de los software NexaMon OEM y B SZ PG 1200, se realiza la monitorización del módulo NEXA y el convertidor DC/DC respectivamente. El software de visualización del convertidor DC/DC se muestra en la figura 5.18. La gráfica representada así como los valores que aparecen, hacen referencia al convertidor, cuando se encuentra en el modo “power” (color azul). Cuando se enciende el sistema mediante el panel de operaciones, el convertidor DC/DC, independientemente del estado de carga de las baterías, inicia un ciclo completo de carga. Después el sistema entra en la fase “Standby”.

En la pantalla del software del convertidor DC/DC, aparecen las diferentes fases en las que se encuentra el convertidor: Standby, Power y Shutdown (Tabla 5.3). En la parte superior izquierda de la pantalla, nos indica si estamos monitorizando el módulo Nexa o el convertidor DC/DC. No obstante, aunque el software del convertidor también monitoriza los principales parámetros del módulo Nexa, se instaló un software específico para este denominado NexaMon OEM.

La duración de cada fase depende del estado de carga de las baterías. Inicialmente, si la batería está muy descargada y su voltaje es muy bajo, la corriente de carga se caracteriza por tener una intensidad elevada y un voltaje bajo, similar al de la batería. A medida que se va cargando la batería, y su voltaje aumenta, la carga se realiza a voltajes elevados e intensidades cada vez menores. De esta forma, se optimiza el proceso de carga de las baterías.

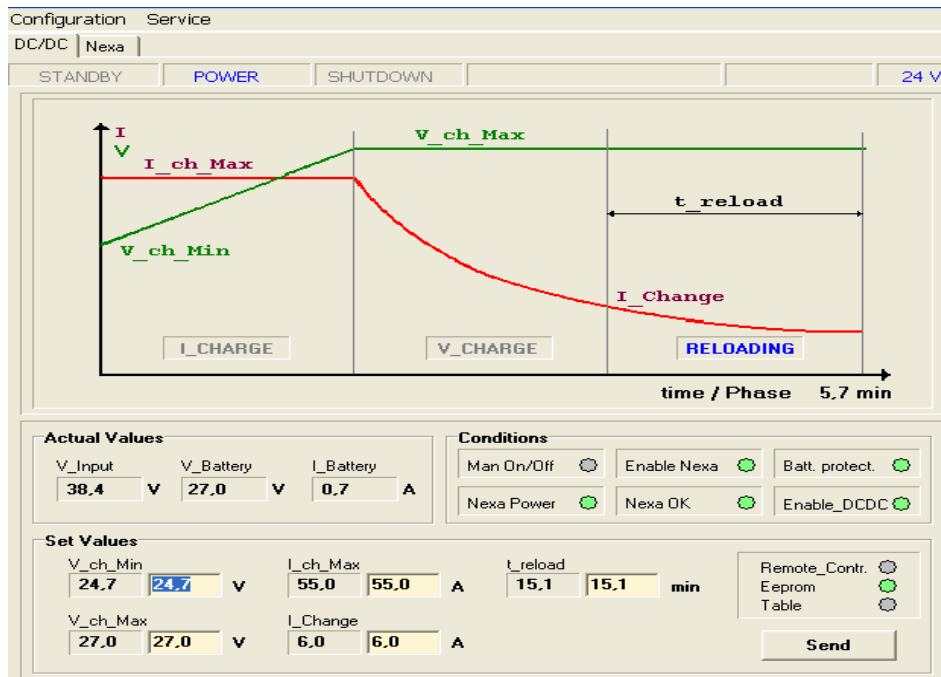


Figura 5.18.- Software del convertidor DC/DC.

Por otra parte, el software específico NexaMon OEM empleado para el módulo Nexa, es capaz de monitorizar 17 variables y permite la representación instantánea de aquellas seleccionadas. En la figura 5.19, se muestra la pantalla principal de este software. En la parte superior izquierda de la pantalla, nos indica el estado en el que se encuentra el módulo Nexa, en la pantalla ejemplo, aparece en standby.

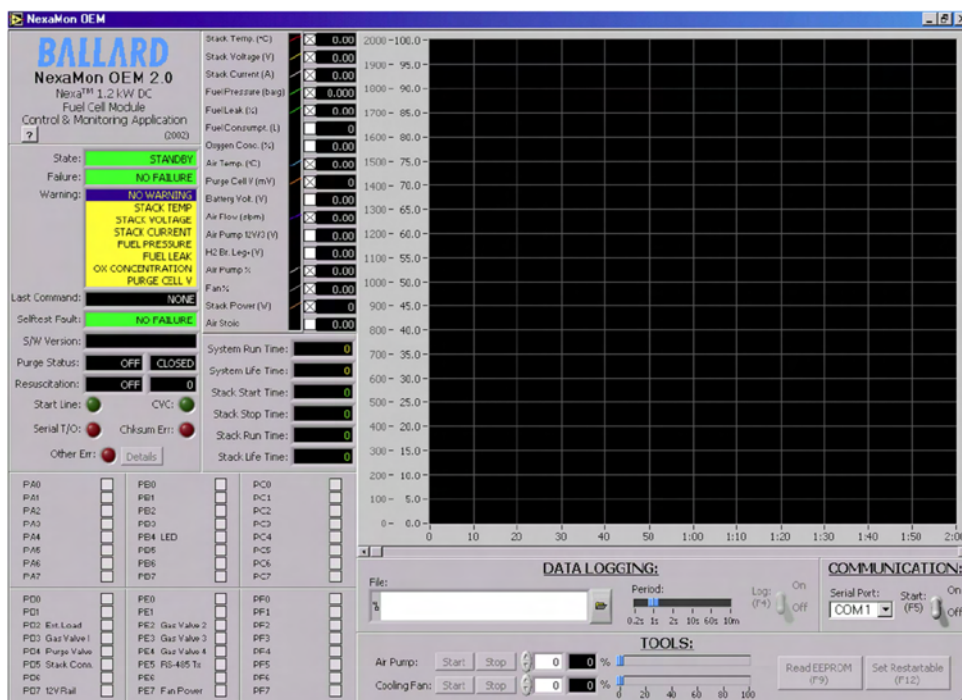


Figura 5.19.- Software NexaMon OEM para el módulo Nexa.

FUNCIONES DE TRABAJO DEL CONVERTIDOR DC/DC	
STANDBY	El convertidor DC/DC monitoriza el voltaje de las baterías. Si el voltaje de las baterías es superior al mínimo fijado (V_{ch_Min}) el relé cierra el circuito y es posible alimentar cargas externas. Cuando el voltaje de las baterías alcanza el mínimo fijado (V_{ch_Min}), se conecta el módulo NEXA. Cuando el módulo NEXA está preparado para suministrar energía, el convertidor pasa a la fase "Power".
POWER	Carga de intensidad (Current Charge): La primera fase del modo "power" es "I_Charge", en la cual el sistema actúa como una fuente de corriente. Empezando de cero, la corriente suministrada por el módulo NEXA se va incrementando hasta la intensidad máxima fijada (I_{ch_Max}). El voltaje se fija para que la potencia no supere nunca los 1200W. Cuando el voltaje de las baterías alcanza el máximo fijado (V_{ch_Max}) por la carga de corriente, el convertidor pasa a la fase de carga de voltaje (V_Charge).
	Carga de voltaje (Voltage charge): Durante esta fase (V_Charge), el sistema actúa como una fuente de voltaje. El voltaje de carga se ajusta al máximo voltaje de carga (V_{ch_Max}) de la batería. El máximo de corriente de carga se ajusta para que la potencia sea inferior a 1200W. El convertidor DC/DC pasa a la fase "Reloading" cuando la corriente de carga cae por debajo de la corriente fijada "I_Change".
	Recarga (Reloading) Durante esta fase, el sistema sigue cargando de voltaje las baterías durante el tiempo fijado (t_{reload}). Este tiempo vuelve a empezar si la corriente supera el valor fijado de corriente I_Change .
SHUTDOWN	Durante esta fase, se inicia el cierre del módulo NEXA. Cuando el módulo NEXA entra en fase "standby", el convertidor pasa a fase "standby". Si durante esta fase, el voltaje de la batería alcanza el valor mínimo fijado (V_{ch_Min}), el convertidor vuelve a la fase "power".

Tabla 5.3.- Modos de trabajo del convertidor DC/DC.

Cuando esta en el estado “OFF”, las baterías de arranque , los sensores, actuadores y el microprocesador están desconectados. El estado “STANDBY” se alcanza cuando se conectan las baterías de arranque de 24 voltios, en este momento, los sensores y los actuadores se encuentran conectados, y el sistema esta continuamente monitorizado, realizando un pre-chequeo interno.

Cuando el pre-chequeo se completa y aplicamos una señal de 5V (con el panel de operaciones), el módulo NEXA comienza la secuencia de STARTING, en la cual la válvula solenoide de hidrógeno se abre y tanto el compresor de aire como el ventilador comienzan a funcionar. Cuando el sistema finaliza su chequeo interno, el módulo pasa a la fase denominada RUNNING.

Cuando se elimina la señal de 5V, el módulo entra en la fase de apagado denominada STOPPING. Durante esta fase, el relé se abre para aislar el módulo y se inicia un protocolo para finalizar con la vuelta al estado OFF del módulo NEXA.

Además de estas fases, en caso de fallo del módulo habría otros estados: WARNING, FAILING, NON-RESTARTABLE.

5.4.- LINEA DE PROPULSIÓN.

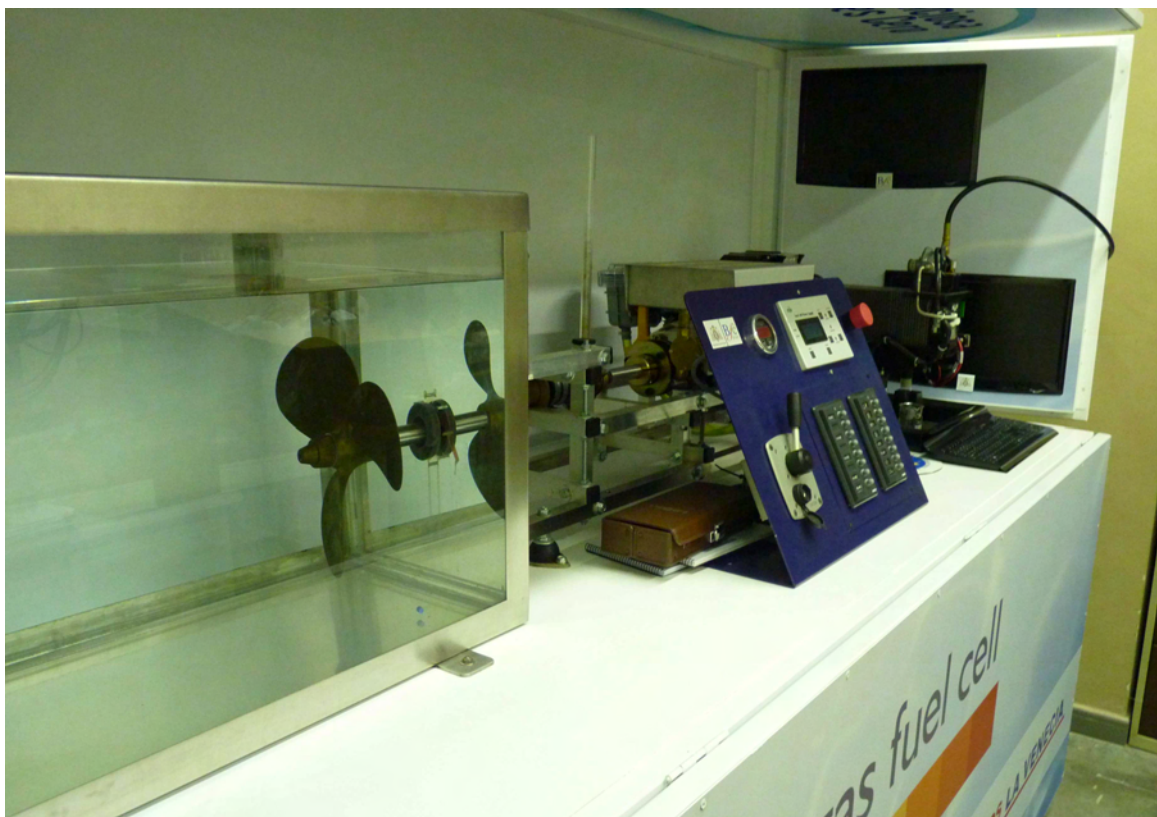


Figura 5.20.- Banco de pruebas y estructura móvil.

La corriente generada por el sistema de la pila de combustible PEM estabilizada a 24 VDC, alimenta dos racks de baterías; uno pertenece a la línea de propulsión y el otro a las líneas de consumos auxiliares. Mediante un repartidor de corriente se distribuye automáticamente la corriente de carga a los dos conjuntos de baterías (propulsión y consumos), en función de la demanda de carga de cada rack de baterías.

El banco de pruebas (figura 5.20) montado sobre una estructura móvil, se ha creado como un dispositivo que pretende asemejarse lo más posible a la línea de propulsión de una embarcación. Para esto se ha dispuesto de un motor eléctrico acoplado mediante el empleo de un silenblock a un eje y este último a una hélice encargada de generar el empuje para mover la embarcación. Como en un barco la hélice va a encontrarse sumergida en el agua, se creó un pequeño tanque con agua dulce para reproducir las resistencias y los esfuerzos a los que se encuentra sometida una hélice acoplada a una embarcación durante la navegación.

A continuación, se describen de manera detallada, los elementos que componen la línea de propulsión del banco de pruebas:

5.4.1.- Motor eléctrico VETUS EP 2200 K.

Se trata de un motor de corriente continua (figura 5.21) sin escobillas de carbón, lo que lo hace libre de mantenimiento y con un bajo nivel acústico y de vibraciones. Tiene una relación peso/potencia muy favorable y su rendimiento a bajas revoluciones es superior al de los motores convencionales dotados con escobillas de carbón. Sus bajas revoluciones de trabajo inferiores a 1.250 rpm permiten conectarlo directamente a la línea de ejes sin necesidad de emplear una caja reductora.



Figura 5.21.- Motor Vetus EP 2200 K.

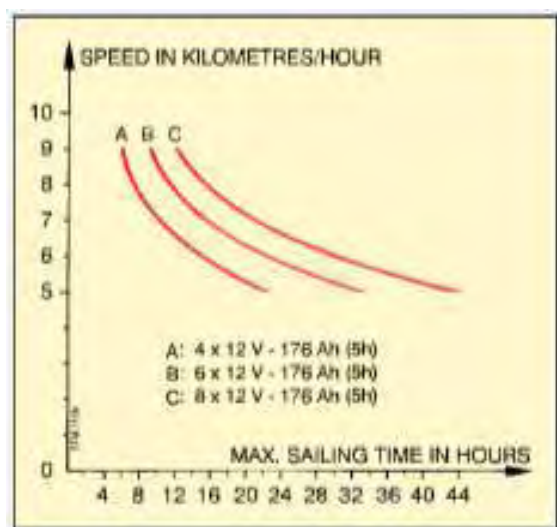


Figura 5.22.- Gráfica ejemplo: Capacidad de las baterías en función de la velocidad desarrollada por el motor.

Desarrolla una potencia máxima de 2.2 KW a 1250 rpm y un par de 16.8 Nm. Además dispone de un regulador de revoluciones y una conexión flexible para la unión a una línea de eje de 25 mm de diámetro. En la figura 5.22 se muestra una grafica donde aparece un ejemplo del tiempo de navegación resultante a diversas velocidades y capacidades de batería.

Para la propulsión se han empleado dos baterías AGM de 12V y capacidad 100 Ah, conectadas en serie para alimentar el motor con 24 voltios. El electrolito de este tipo de baterías está absorbido en una matriz de fibra de vidrio (AGM = Absorbed Glass Mat) entre placas forjadas de plomo y calcio. Son adecuadas tanto para descargas lentas como rápidas, con un ciclo de vida de 10 años y con ciclos de carga/descarga total del orden de 375, por lo tanto se presentan como una buena opción para alimentar el motor eléctrico durante la navegación.

5.4.2.- Línea de eje y hélice.

Para soportar el motor y el eje, se ha desarrollado una estructura de aluminio (figura 5.23) que va anclada a la superficie del cajón metálico que contiene el banco de pruebas. Esta estructura de aluminio facilita la alineación del eje con el motor, no obstante la unión entre ambos se realiza mediante una conexión flexible y el motor esta a su vez anclado mediante unos tacos de goma, para minimizar las vibraciones.

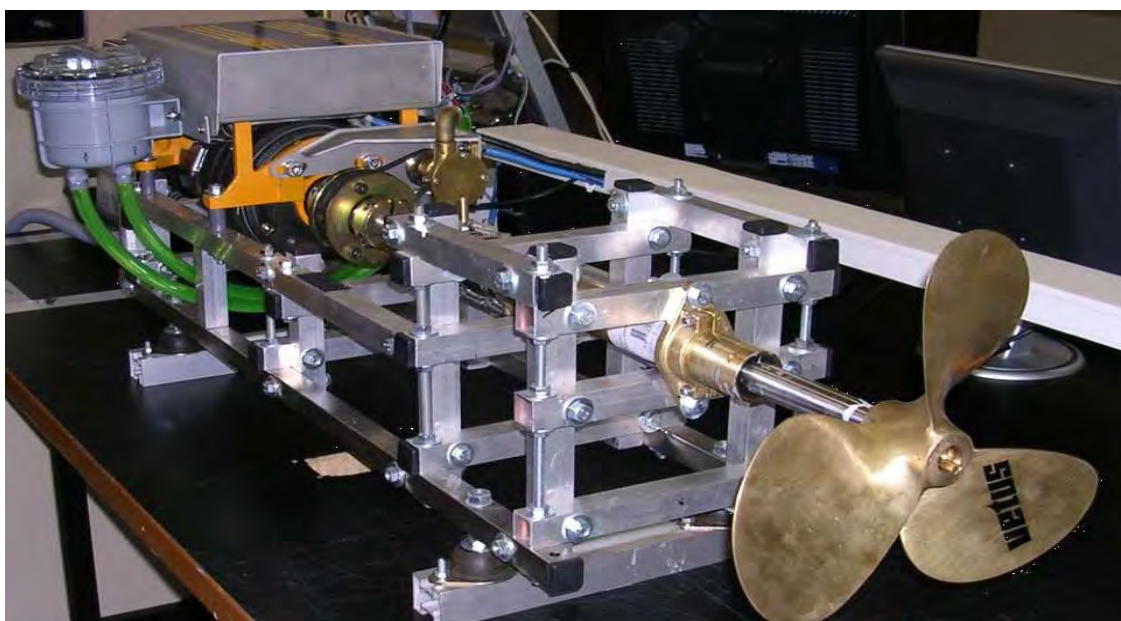


Figura 5.23.- Estructura de aluminio.

Se ha seleccionado un eje de acero de 1000mm de longitud y 25 mm de diámetro, ya que el acoplamiento del motor viene preparado para esta sección de eje. Además, debido a que vamos a introducir la hélice en un depósito con agua, el eje deberá atravesar la pared del mismo, garantizando la estanqueidad. Para esto hemos dispuesto de un tubo de bronce con cojinete de goma de 25 mm de diámetro, un cojinete interior auto-alineante de 25 mm de diámetro y un

engaste de montaje para tubo de 25 mm de diámetro que hace las veces de chumacera de empuje. En la figura 5.24, se muestra el conjunto del eje y la hélice.

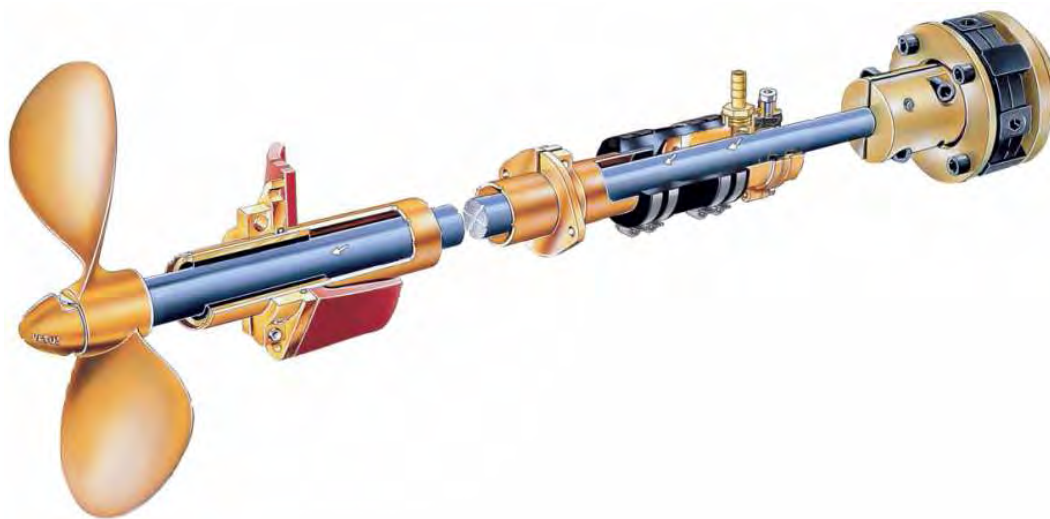


Figura 5.24.- Conjunto de eje y hélice.

La hélice (figura 5.25) empleada tiene un diámetro de 300 mm y es de tres palas con giro dextrógiro (a derecha). Su relación de áreas es del 53 % y su relación de paso es de 225 mm. Esta fabricada de una aleación tipo “cunial” (cobre-níquel-aluminio). Nos permite velocidades de desplazamiento de unos 8 nudos, en embarcaciones con una eslora comprendida entre los 7 y los 8 m.

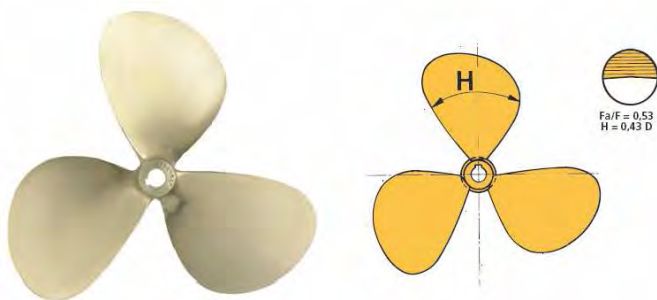


Figura 5.25.- Hélice de tres palas dextrógiro.



Figura 5.26.- Tanque de agua.

El tanque (figura 5.26) que se ha fabricado para realizar los experimentos esta realizado de metacrilato de un espesor de 10 mm, soportado por unos angulares de acero inoxidable, lo que lo hace totalmente transparente y permite observar el comportamiento de la hélice. Sus dimensiones son 490x 490 x 980 mm de alto, ancho y largo respectivamente. La tapa superior es escamoteable, para permitirno manipular la hélice y llenar el tanque de agua. En uno de los laterales, a 200 mm del fondo, se practicó un orificio centrado de 50 mm de diámetro, para permitir colocar el elemento sellante en la zona en que el tanque es atravesado por ele eje.

5.5.- LINEA DE CONSUMOS.

En toda embarcación, ya sea propulsada mediante un motor de combustión interna o mediante un motor eléctrico, como es el caso, además de la corriente generada para la propulsión del motor, el barco va a necesitar una potencia eléctrica auxiliar para satisfacer los requerimientos de los equipos de radio-navegación (radar, GPS, etc.) o los de ayuda a la pesca (sonar); además de asegurar las demandas de AC al suplementar la potencia eléctrica del generador acoplado al motor principal en las artes de pesca que demanden puntas de potencia eléctrica debidas al consumo de la maquinaria auxiliar, como son maquinillas de arrastre, bombas, etc.



Figura 5.27.- Convertidor DC/AC.



Figura 5.28.- Repartidor de corriente.

En nuestro caso, para llevar a cabo la experimentación con el banco de pruebas, se crearon dos líneas de consumos, una de corriente continua y la otra de corriente alterna, que representan los consumos típicos de una embarcación. Debido a que el módulo de la pila Nexa proporciona corriente continua, se empleó un convertidor DC/AC (fig. 5.27), para obtener esta corriente alterna. Este convertidor DC/AC, transforma la corriente continua procedente de las baterías de 24 VDC a 230 VAC y 50 Hz. La potencia nominal de este equipo es de 500 W.

Para esta línea de consumos se emplearon dos baterías marinas sin mantenimiento de tipo plomo-calcio de 12 V y 55 Ah conectadas en serie para proporcionar 24 V. Estas baterías están diseñadas especialmente para su uso en embarcaciones, ya que se caracterizan por una vida muy alta, un ratio de autodescarga muy bajo y son del tipo sin mantenimiento. A continuación se detallan los consumos de las dos líneas:

Línea de Consumos de corriente continua:

- Toda la iluminaria de la embarcación: 24 VDC y 100W.
- Se supuso la alimentación de un motor eléctrico para mover un limpiaparabrisas de la cabina, también de 24 VDC y 100W de potencia.

- Una toma de corriente continua, en la cual poder conectar cualquier equipo que funcione con 24 VDC.

Línea de Consumos de corriente alterna:

- Toda la iluminaria de la embarcación: 220 VAC y 50 W.
- Se supuso la alimentación de un motor eléctrico de un grupo de presión: 220 VAC y 25 W de potencia.
- El ordenador y el monitor a 220 VAC y 300 W, encargado de monitorizar el sistema de la pila de combustible.
- Una toma de corriente alterna, en la cual poder conectar cualquier equipo que funcione con 220 VAC.

Capítulo 6: Ensayos en el Banco de Pruebas del Laboratorio.

Una vez finalizada la construcción del Banco de Pruebas, lo primero que se realizó fue la puesta a punto de todos los equipos. Se estudió la duración y las características de las distintas fases de funcionamiento de la pila Nexa, y se estableció un protocolo de arranque y parada de la pila (ver capítulo 5). Una vez familiarizados con el funcionamiento del conjunto del equipo del Banco de pruebas, se procedió a realizar los ensayos. Estos se agrupan en tres bloques, donde se muestran los ensayos realizados y las conclusiones obtenidas.

6.1.- PRIMER BLOQUE DE ENSAYOS EN EL LABORATORIO.

En este primer bloque, se ensayó en un primer momento el módulo Nexa funcionando únicamente como sistema de propulsión y posteriormente se aisló de la línea de propulsión y se simuló cargas procedentes de la línea auxiliar de consumos. Finalmente, se trabajó con el módulo Nexa conectado a ambas líneas (línea de carga y línea de consumos auxiliares).

6.1.1.- Ensayo con el módulo Nexa conectado a la Línea de Propulsión.

Para el estudio del módulo Nexa como sistema de propulsión, se realizaron dos ensayos partiendo de condiciones diferentes. En el primer ensayo el agua del tanque se encontraba ligeramente por encima de la hélice y en el segundo ensayo, el tanque de agua se encontraba totalmente lleno. A continuación se detallan los resultados obtenidos en cada uno de ellos:

Ensayo con el tanque de agua parcialmente lleno.

La experiencia de propulsión, no se inicia hasta el minuto 70, momento en que la pila deja de cargar las baterías auxiliares y estas son desconectadas. A partir de este momento, las baterías auxiliares nos alimentan los ordenadores y la Pila de combustible, queda conectada directamente al motor eléctrico. Se va aumentando la velocidad de la hélice progresivamente (tabla 6.1), para obtener la gráfica de potencia (color marrón), intensidad (color blanco) y voltaje (color amarillo) del stack de la pila. (Figura 6.1).

Ensayo con el tanque de agua parcialmente lleno		
En el minuto	Velocidad de la hélice	Sentido de giro
70	160 rpm	Dextrógiro
75	200 rpm	Dextrógiro
77	275 rpm	Dextrógiro
80	320 rpm	Dextrógiro
82	0 rpm	
83	150 rpm	Levógiro
85	230 rpm	Levógiro

Tabla 6.1.- Variación de velocidad de la hélice.

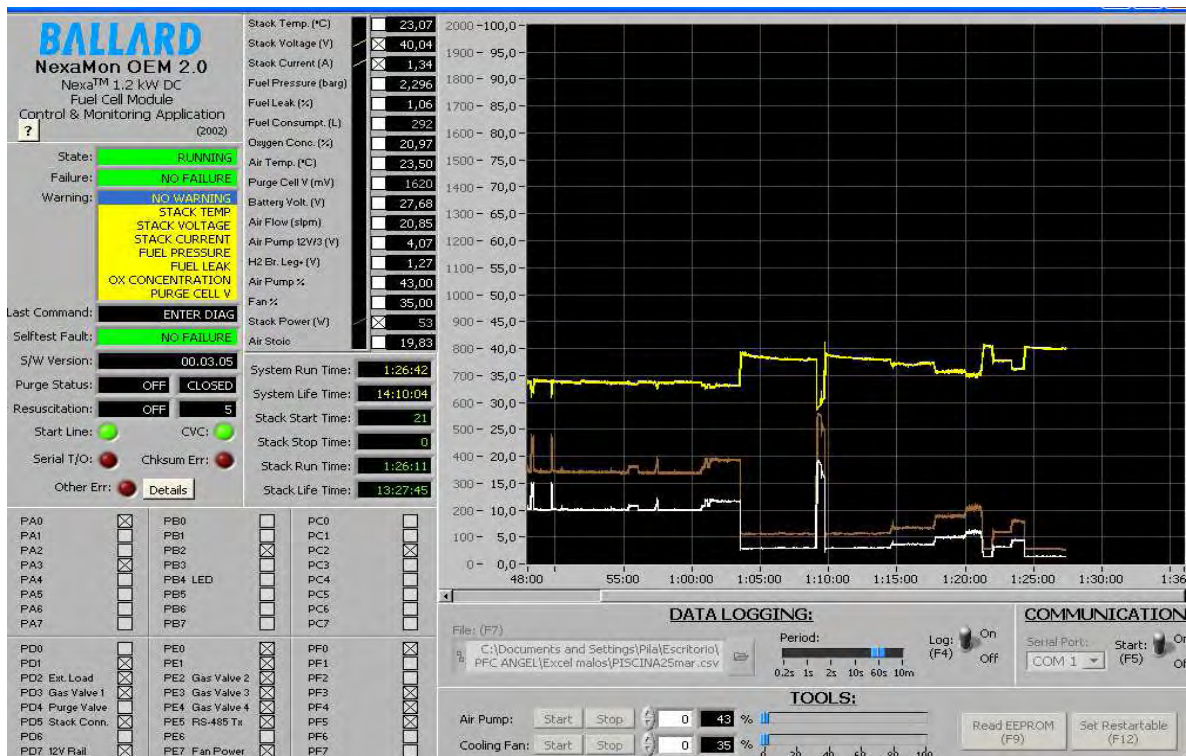


Figura 6.1.- Gráfica de potencia, intensidad y voltaje del stack de la pila con el tanque de agua parcialmente lleno.

Ensayo con el tanque de agua totalmente lleno.

Finalizado el ensayo con el tanque parcialmente lleno de agua, se procedió a realizar este segundo ensayo. Para este caso, el tanque se encuentra totalmente lleno de agua. El ensayo comenzó en el minuto 90 (tras finalizar el anterior ensayo), encontrándose la hélice en el minuto 91 girando a 160 rpm en sentido dextrógiro. En este momento, dado que los requerimientos de potencia a esta velocidad de giro son muy bajos, el módulo Nexa, entro en fase “standby” y el motor eléctrico siguió girando alimentado por la baterías de arranque de la Pila PEM. En el minuto 98, las baterías alcanzaron un voltaje inferior al fijado (V_{ch_min}), generando de nuevo electricidad el módulo Nexa. A partir de minuto 98, se aumento de manera progresiva la velocidad hasta alcanzar las 500 rpm en el minuto 109, momento en que se dio un golpe de velocidad y se detuvo la hélice. En el grafico 6.2, se puede ver la gráfica de potencia (color marrón), intensidad (color blanco) y voltaje (color amarillo) del stack de la pila para este ensayo.

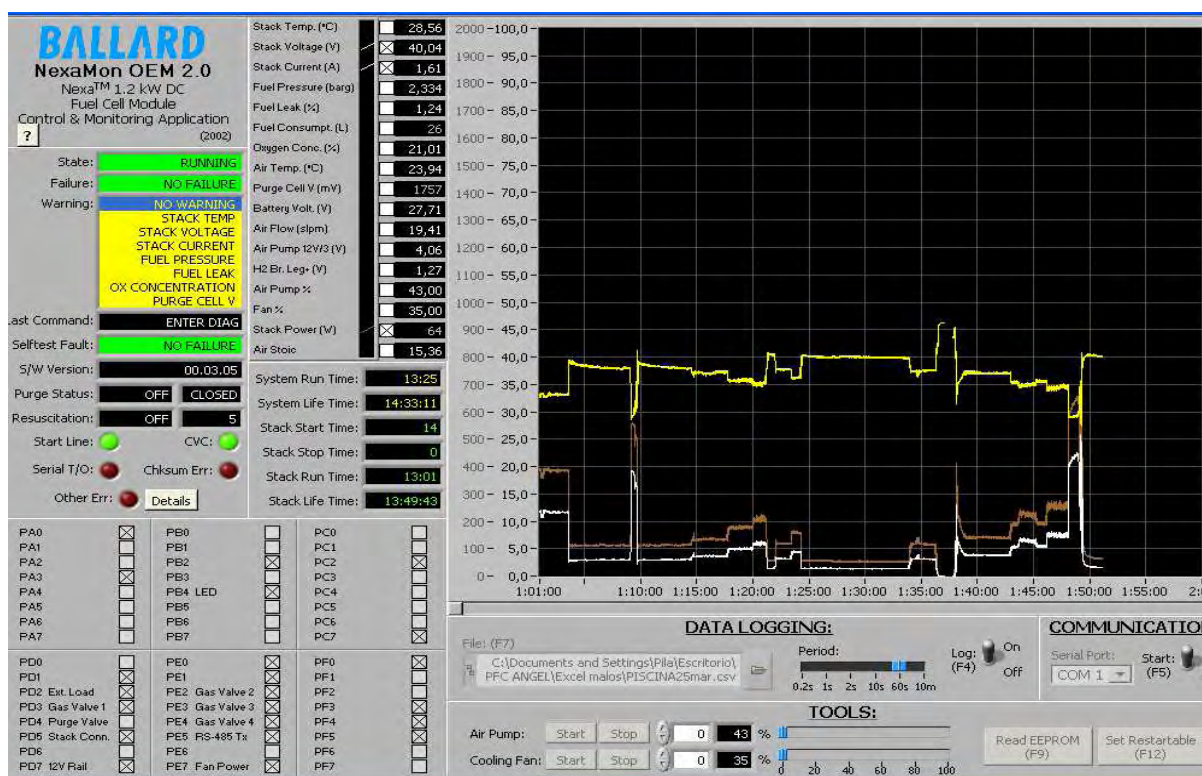


Figura 6.2.- Gráfica de potencia, intensidad y voltaje del stack de la pila con el tanque de agua totalmente lleno.

6.1.2.- Ensayo con el módulo Nexa conectado a la Línea Auxiliar de Consumos.

Para estudiar el comportamiento del módulo Nexa, cuando es empleado para alimentar la línea auxiliar de consumos, se realizó la conexión de los diferentes consumos de un modo escalonado. En la tabla 6.2, se muestra la secuencia seguida.

Los valores obtenidos para estas variaciones de carga, aparecen representados en la gráfica de la figura 6.3, a través de las curvas de voltaje de stack (color azul), intensidad de stack (color violeta), potencia de stack (color amarillo), temperatura de stack (color rojo) y consumo de combustible (color verde).

Se puede observar, que la potencia ($P = V \cdot I$) máxima generada por el módulo Nexa, alcanzo valores próximos a los 700 W, siendo estos máximos en el momento de conexión del motor DC. También se puede ver como la temperatura del stack se mantuvo prácticamente estable hasta la primera mitad del ensayo, alcanzando en la segunda mitad una temperatura máxima de 39°C durante un corto periodo de tiempo. En cuanto al consumo de hidrógeno durante la experimentación, se ve como va aumentando de manera progresiva llegando a los 125 litros estándar.

Minuto	Secuencia de conexiones de la línea de consumos.
0	Conectados ordenador y pantalla. Se alimentan de las baterías auxiliares a través del convertidor DC/AC.
1	Se conecta el módulo Nexa. (Esta aislado de los consumos)
3	El módulo Nexa comienza a cargar las baterías auxiliares. A medida que se van cargando las pilas, disminuye la potencia suministrada por la pila. En el momento en que las baterías están totalmente cargadas, la pila suministra la potencia requerida por los ordenadores.
10	Se conecta el motor de corriente alterna.
12	Se desconecta el motor de corriente alterna y 30 segundos después se conectan las iluminarias AC.
14	Se conecta la toma de corriente alterna y se enchufa un vatímetro.
16	Se conecta la luz DC.
18	Se conecta el motor DC.
22	Se desconecta el motor DC.
27	Se desconecta la luz DC.
29	Se desconecta la toma de corriente alterna y se desenchufa el vatímetro.
30	Se desconectan las iluminarias AC.

Tabla 6.2.- Secuencia de conexiones de la línea de consumos.

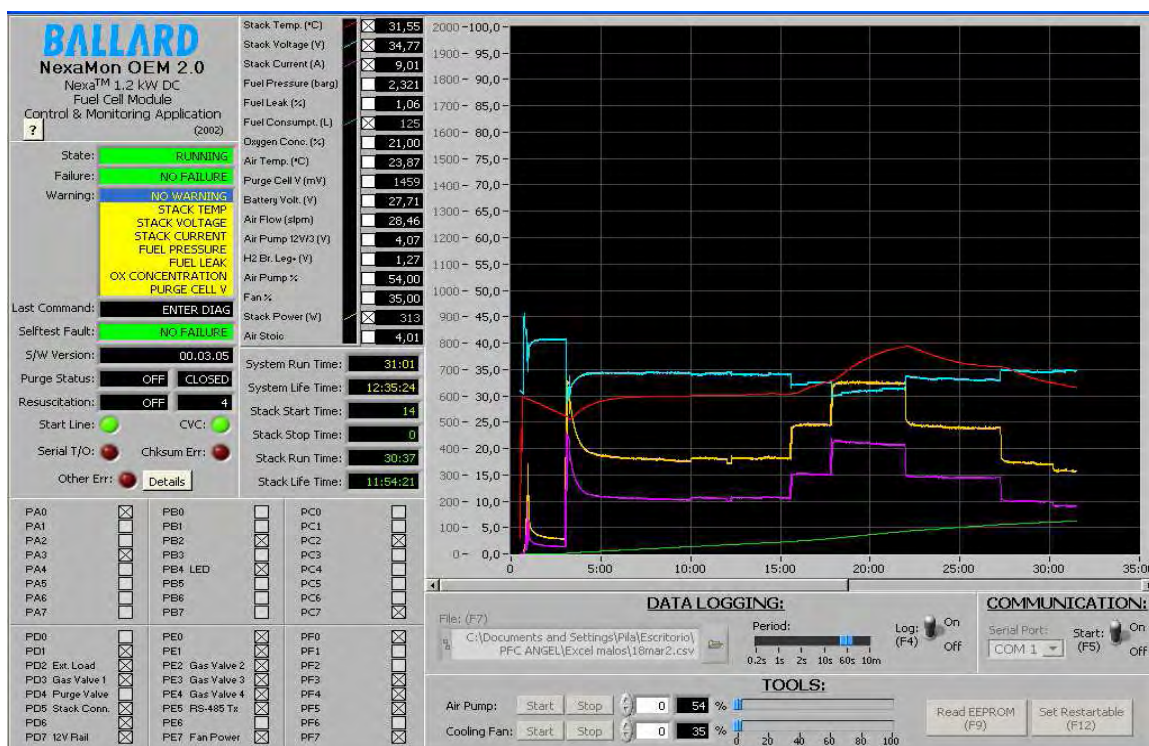


Figura 6.3.- Gráfica de potencia, intensidad, voltaje, temperatura y consumo de hidrógeno del stack de la pila cuando se realiza la secuencia de consumos de la línea auxiliar.

Además de los valores representados en esta gráfica, se obtuvieron otros valores, como el voltaje de las baterías de arranque, la concentración de oxígeno en el aire, la temperatura del aire o el flujo de aire de alimentación.

Otro dato que nos aparece reflejado en el software de la pila, es el “*fuel leak %*”. Este valor hace referencia a la concentración de hidrógeno en la corriente de salida. Como ya se vio, durante la reacción electroquímica en el stack, el hidrógeno del agua generada y del aire, migra a través de las celdas y va acumulándose en las denominadas celdas de purga. Esto hace que disminuya el rendimiento global del sistema. Para recuperar la eficiencia del sistema, se emplea una válvula de purga que libera este hidrógeno, cuando el voltaje del sistema disminuye de un voltaje prefijado. Cuando esta válvula libera una concentración de hidrógeno superior a 10000 ppm, salta una alarma que nos indica que estamos en un 25 % del límite inferior de inflamabilidad del hidrógeno en aire, evitando de este modo posibles accidentes.

Durante este ensayo, con el fin de evaluar el consumo de hidrógeno del módulo Nexa , se opero durante 60 minutos a una potencia constante de 450 W, generando un consumo de hidrógeno de 308 litros estándares. Por tanto, es fácil deducir que el consumo por minuto de la pila es de 5.13 slpm (Standard liters per minute).

6.1.3.- Balance de Planta.

En este tercer ensayo, se partio del módulo Nexa trabajando en vacio y gradualmente se fue conectando a la línea de propulsión y a la línea de consumos auxiliares. El objetivo fue estimar la intensidad y voltaje en distintos puntos del banco de pruebas. La figura 6.4 representa la variación de la intensidad (color blanco), voltaje (color amarillo) y potencia (color rojo) del módulo NEXA durante la experiencia.

Se comenzó con el arranque del módulo NEXA y se procedió a la toma de datos en vacio, es decir, aislado el sistema de pila de combustible PEM de los consumos exteriores (línea auxiliar y de propulsión). Posteriormente, en el minuto 16 se conecto la línea de propulsión y se ajusto la velocidad de giro de la hélice a 320 rpm. A partir del minuto 22 se incremento la velocidad a 700 rpm durante unos instantes y después se detuvo progresivamente. En el minuto 26 se conectan los consumos auxiliares y como se observa en la grafica, inicialmente el sistema de pila de combustible PEM da un golpe de intensidad para cargar las baterías auxiliares y posteriormente, esta intensidad va disminuyendo a medida que se van cargando las baterías.

En la tabla 6.3 se recogen los valores de la intensidad, el voltaje y la potencia generada por la pila Nexa en vacio y cuando trabajamos exclusivamente con la línea de propulsión con la hélice girando a una velocidad de 320 rpm. En esta, no aparecen reflejados los datos durante el

periodo de trabajo con la línea de consumos auxiliares, esto es debido, a que no se mantenían constantes, al encontrarse en proceso de carga las baterías.

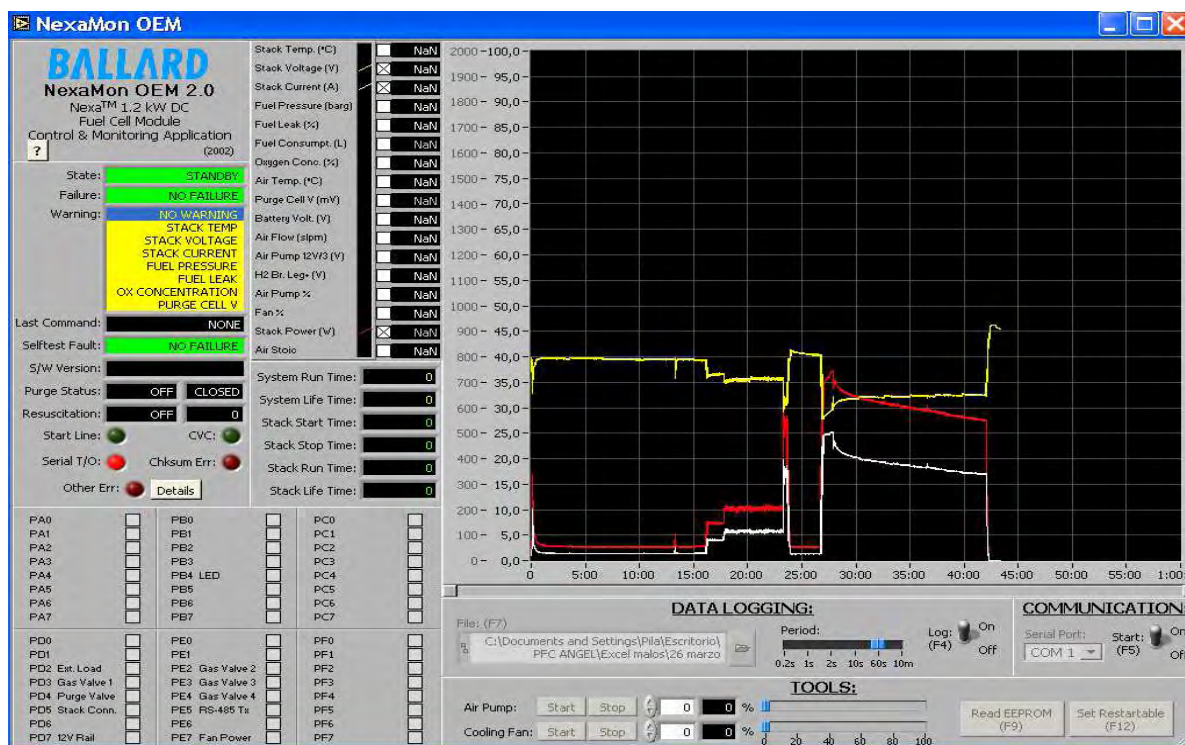


Figura 6.4.- Gráfica de la variación de potencia, intensidad y voltaje del stack de la pila durante el ensayo de Balance de Planta.

CARGA	SALIDA PILA NEXA			SALIDA SISTEMA PILA DE COMBUSTIBLE.			ENTRADA MOTOR ELÉCTRICO		
	I (A)	V (V)	P (W)	I (A)	V (V)	P (W)	I (A)	V (V)	P (W)
VACIO	1.34	39.50	52.93	-	27.00	-	-	-	-
LINEA DE PROPULSIÓN	5.70	35.46	202.12	4.90	26.95	132.06	4.70	26.94	126.62

Tabla 6.3.- Valores de Potencia, intensidad y tensión en diferentes puntos del Banco de Pruebas.

6.1.4.- Análisis de resultados.

Durante los ensayos, se realizaron variaciones de la velocidad del giro de la hélice (no se sobrepasaron las 700 rpm para evitar someter el deposito a mucha tensión) que dieron lugar a variaciones en la carga demandada. Ante estas variaciones de carga la Pila de combustible PEM dio respuesta inmediata. De este resultado, se podría deducir que el rack de baterías es prescindible, pero esto no es así por los motivos que a continuación se exponen:

- Permite que la Pila de combustible PEM genere corriente eléctrica de forma continua, evitando picos que puedan a largo plazo afectar de forma negativa al stack de la pila.
- Nos permite suministrar potencias superiores a 1.2 KW en momentos puntuales esto, es interesante, ya que recordemos que el motor eléctrico empleado tiene una potencia máxima de 2.2 KW.
- En caso de fallo de la pila de combustible PEM, podemos seguir suministrando corriente eléctrica.

En los ensayos realizados con la línea de propulsión con el tanque lleno de agua (simula el barco con más carga) el consumo de potencia es menor para la misma velocidad de giro de la hélice, que si el tanque se encontrara parcialmente lleno. No obstante esta situación en el caso de una embarcación real, implicaría que el barco tiene que desplazar una mayor carga y por tanto va a tener un consumo energético más elevado. Además, de estos ensayos realizados con la línea de propulsión se deduce, que para bajas velocidades de giro de la hélice, la demanda de potencia es pequeña, aumentando esta exponencialmente a medida que se va aumentando la velocidad de la hélice. Esto es lógico, si tenemos en cuenta que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad ($P=k \cdot v^3$).

Si partimos de esta simplificación lineal de la relación de la velocidad con la potencia y a partir de las especificaciones del motor eléctrico, podemos deducir en base a los datos obtenidos en la experiencia que se llevo a cabo con la línea de propulsión cuando la hélice se encontraba girando a 320 rpm, que una embarcación de eslora entre seis y siete metros, puede navegar en puerto a una velocidad aproximada de 2.5 nudos. Demostración:

Especificaciones del motor: 50 A y 24 V a 1200 W a una velocidad de 2.5 m/s

Como la $P = k \cdot v^3$ despejando $K = P / v^3$

Siendo $P = 1200W$ y $v = 2.5 m/s$

Luego $K = 76.8 W/(m/s)^3$

En el ensayo realizado con la línea de propulsión se obtuvo una potencia aproximada de 180W, cuando la hélice giraba a 320rpm.

Aplicando estos datos en la fórmula $P = k \cdot v^3$

Obtenemos que $v = 1.32 m/s \approx 2.5$ nudos.

Durante el segundo ensayo realizado con la pila de combustible PEM conectada a la línea de consumos auxiliares, se analizo el consumo de la pila manteniendo una carga constante de 450 W de modo que el consumo de hidrógeno ascendió a 5.13 slpm (Standard liters per minute). Si comparamos este consumo con el de las especificaciones técnicas del módulo Nexa (figura 5.14) que es de 18.5 slpm a 1.2 KW, este resulta ser inferior al esperado (6 slpm). Por tanto, la

eficiencia del módulo Nexa a 450 W es aproximadamente del 52 %. A continuación se expone la justificación teórica.

Dado que el poder calorífico del H₂ es de 10050 KJ/m³

El consumo es de 5.13 slpm \approx 0.31 m³/h

$0.31 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 10050 \text{ KJ/m}^3 = 3155 \text{ KJ/h} \cdot 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} = 0.865 \text{ KJ/s} = 865 \text{ W}$

La eficiencia del módulo Nexa = 450 W / 865 W = 52 %

Durante el tercer ensayo, en el cual se evaluó el voltaje y la intensidad en distintos puntos del banco de pruebas, los resultados obtenidos (tabla 6.3) permiten confirmar que parte de la electricidad generada por el módulo NEXA no llega a los consumos externos, ya que una parte se emplea para el funcionamiento del módulo NEXA y otra parte para la carga de las baterías de arranque. En este caso, de 202W generados, solo salen del sistema completo de pila de combustible PEM unos 132W (en parte porque las baterías estaban muy descargadas).

Además, otra parte de esta electricidad, se pierde a lo largo de los cables, ocasionando una disminución del voltaje. Estas pérdidas son proporcionales a la intensidad de la corriente, ya que los cables actúan como una resistencia constante y según la ley de Ohm: $V=I.R$. En nuestra experiencia concreta, de la electricidad generada por el módulo NEXA, un 35% lo autoconsume el módulo sistema de pila de combustible PEM y un 3% se pierde en el cableado. Estas pérdidas son relativas y difícilmente reproducibles ya que depende en gran medida del estado de carga de las baterías de arranque.

6.2.- SEGUNDO BLOQUE DE ENSAYOS EN EL LABORATORIO.

En este segundo bloque de ensayos, se realizó el estudio de las curvas características de polarización de la pila de combustible PEM. Para la obtención de estas curvas, se construyó un circuito con lámparas asociadas en paralelo, que nos permitió demandar diferentes cargas a la pila de combustible. A continuación se describen los ensayos realizados y las conclusiones obtenidas.

En este ensayo, se realiza la comparación de las curvas características proporcionadas por el manual Nexa, con las curvas obtenidas mediante la toma de datos en la pantalla a través del software NexaMon (proporcionado por el fabricante) y las obtenidas mediante la toma de datos con nuestros dispositivos de medida, entre los que se encuentran:

- Una pinza amperimétrica KOPAN KP 39 R. Nos permite obtener los datos de intensidad de corriente, con una precisión de 0.1 A (a menos del 80% de humedad relativa y a temperaturas ambientales entre 0 y 50°C).

- Un multímetro digital FLUKE tipo 27 II, con homologación IP 67 a prueba de polvo y agua, capacitado para operar entre -15 y 55 °C, con una precisión en corriente continua de 1 mV a 1000V.
- Un sonómetro RION NL-31, que proporciona un rango de medida hasta 140 dB, con una precisión de 0.1 dB (para rangos de humedad relativos menores al 90%).

6.2.1.- Esquema eléctrico del circuito de lámparas.

Para realizar este ensayo, ha sido necesario crear un dispositivo que permita demandar cargas de manera progresiva al módulo Nexa. Este se fabricó empleando lámparas de automoción, debido a que el comportamiento de estas es perfectamente estable una vez concluido el corto régimen transitorio inicial. Las bombillas empleadas han sido de automóvil de 12 VDC y doble filamento, que proporcionan 60 W de potencia para la luz larga y 55 W para la luz corta, de modo que asociando en serie sus filamentos obtenemos una corriente continua de 24 V y una potencia de 115 W. Esto nos da un valor aproximado a los 27 VDC de tensión que proporciona la Pila Nexa a la salida del regulador.

Para la construcción, se partió de una estructura formada por una placa base, sobre la que va situado el cableado y una placa superior, separada por unos soportes, sobre la que se han colocado las bombillas y los interruptores. La separación entre ambas placas proporciona una cierta holgura entre la parte inferior de las bombillas y la placa base, evitando de este modo la posibilidad de cortocircuitos en las uniones de los cables con las bombillas y los interruptores. Este tipo de construcción, además de resultar económico de fabricar, nos permite conectarlo y desconectarlo de la pila con facilidad, sin interferir de ninguna manera con el banco de pruebas (línea de propulsión y línea de consumos auxiliares) sobre el que se encuentra montado esta.

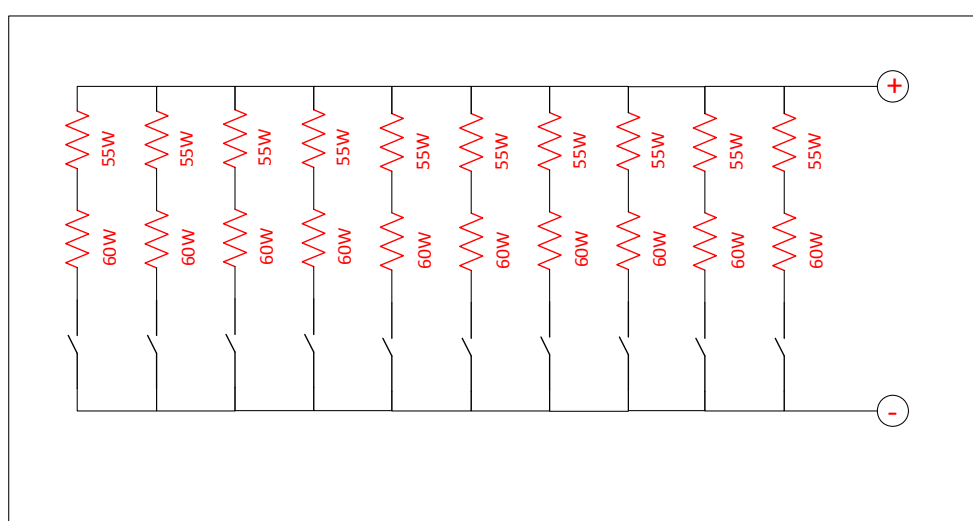


Figura 6.5.- Esquema eléctrico del circuito con lámparas.

Las bombillas se han conectado en paralelo y con un interruptor por línea conectado a cada una de ellas, que nos permite ir activando líneas de manera progresiva y segura. En la figura 6.5 se muestra el esquema seguido. En cuanto al número de lámparas empleado, este ha ascendido a 10, ya que como cada una de ellas nos proporciona individualmente 115 W, cuando trabajan en conjunto, podemos obtener un total de 1150 W, que se encuentra próximo al valor máximo que es capaz de suministrar la pila, suponiendo que las pérdidas son nula.

Para la obtención de las curvas características, se han ido activando las bombillas progresivamente mediante el empleo de los interruptores, haciendo así que la pila incremente progresivamente la potencia entregada. Una vez alcanzada la potencia máxima, se realizó de nuevo la desactivación progresiva de las bombillas, obteniendo así unos transitorios controlados y señal estabilizada antes de la toma de datos. A continuación se muestran las curvas obtenidas en los ensayos realizados.

6.2.2.- Curvas características de Polarización.

Curva de tensión - intensidad.

En la curva de tensión-intensidad (figura 6.6), se representan en el eje de abscisas los valores netos de la intensidad de salida, aumentando estos de cinco en cinco amperios hasta una intensidad máxima de 30 A y en el eje de ordenadas, se representan los valores de las tensiones expresadas en voltios. La intensidad de salida, se ha mantenido en un valor máximo de 30 A (se ha conectado un máximo de siete bombillas), sin llegar a los 45 A que proporciona el módulo Nexa, debido a que a partir de ese momento, se produce un gran desajuste del sistema, que no nos permite la obtención de datos. Para valores superiores a 900 W (8 bombillas = 920 W), el sistema deja de regular provocando una caída en la potencia.

A partir de los valores de la tabla 6.4, donde se comparan los valores de voltaje de salida teóricos frente a los obtenidos con el software NexaMon y con nuestros instrumentos de medida, se han representado las tres curvas:

- Curva de voltaje-intensidad, proporcionada por el manual de Ballard de la pila Nexa.(Azul)
- Curva de voltaje-intensidad, obtenida a través de Software NexaMon. (Rojo)
- Curva de voltaje-intensidad, obtenida con nuestros instrumentos de medida: pinza amperimétrica y multímetro.(Amarilla)

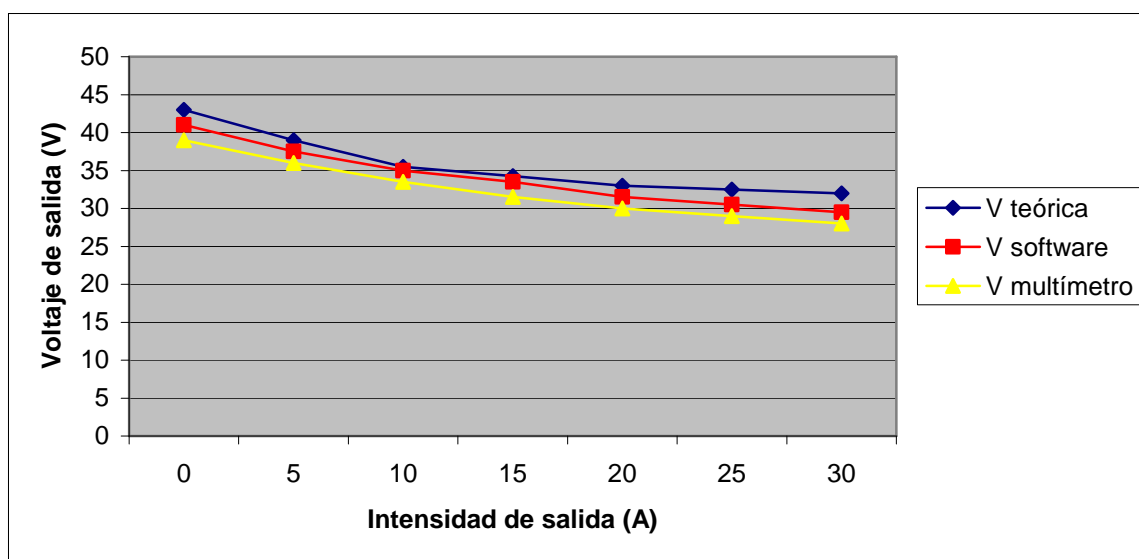


Figura 6.6.- Curva voltaje –intensidad.

INTENSIDAD (A)	VOLTAJE (V)			% ERROR	
	TEÓRICO	EN SOFTWARE	EN MULTÍMETRO	SOFTWARE	INSTRUMENTOS DE MEDIDA
0	43.00	41.00	39.00	4.65	9.30
5	39.00	37.50	36.00	3.85	7.70
10	35.50	35.00	33.50	1.40	5.63
15	34.25	33.50	31.50	2.19	8.00
20	33.00	31.50	30.00	4.50	9.10
25	32.50	30.50	29.00	6.10	10.77
30	32.00	29.50	28.00	7.80	12.50
% ERROR MEDIO				4.35	9.00

Tabla 6.4.- Comparación de los valores de tensión de salida teóricos, con los obtenidos en el software NexaMon y los obtenidos con nuestros instrumentos de medida.

Tras los resultados obtenidos, vemos que los valores proporcionados por el fabricante se ajustan bastante a los obtenidos con el software NexaMon, tan solo difieren con un error medio de 4.35% y se alejan un poco más, pero no demasiado de los obtenidos con nuestros equipos de medida, con los que difieren en un 9 %.

Curva de consumo de hidrógeno.

En la curva de consumo de hidrógeno (figura 6.7), se representan en el eje de abscisas los valores netos de la intensidad de salida, aumentando estos de cinco en cinco amperios hasta una intensidad máxima de 35 A y en el eje de ordenadas, se representan los valores de los consumos de hidrógeno expresados en slpm (“Standard liters per minute”). A partir de los datos la tabla 6.5, donde se comparan únicamente los valores de consumo de hidrógeno teóricos frente a

los obtenidos con el software NexaMon, ya que en este caso no disponemos de datos obtenidos con nuestro instrumental de medida, se han representado dos curvas:

- Curva de consumo de hidrógeno, proporcionada por el manual de Ballard de la pila Nexa.(Azul)
- Curva de consumo de hidrógeno, obtenida a través de Software NexaMon. (Rojo)

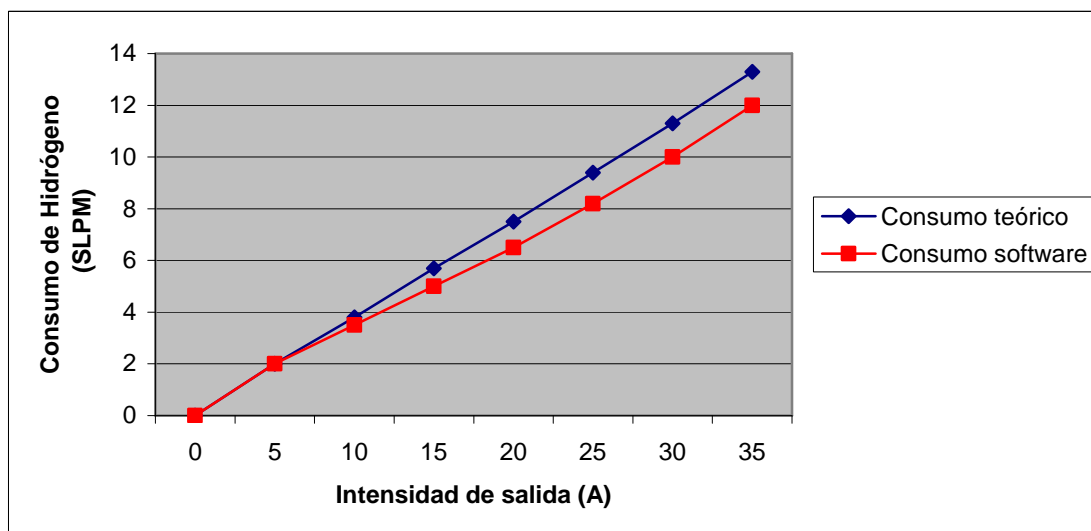


Figura 6.7.- Curva de consumo de hidrógeno.

INTENSIDAD	SLPM		% ERROR
	TEÓRICO	EN SOFTWARE	
0	0.0	0.0	0.0
5	2.0	2.0	0.0
10	3.8	3.5	7.9
15	5.7	5.0	12.2
20	7.5	6.5	13.3
25	9.4	8.2	12.7
30	11.3	10.0	11.5
35	13.3	12.0	9.7
% ERROR MEDIO			8.40

Tabla 6.5.- Comparación de los valores de consumo de hidrógeno teóricos, con los obtenidos en el software NexaMon.

Tras los resultados obtenidos, vemos que los consumos proporcionados por el fabricante son algo superiores a los obtenidos con el software NexaMon, lo que supone un aumento de la autonomía de la Pila, para la misma cantidad de hidrógeno almacenada. No obstante, se puede observar que tan solo difieren con un error medio del 8.40 %.

Curva de Potencia.

Esta curva de potencia (figura 6.8), es de gran interés, ya que nos interesa conocer la potencia real que es capaz de suministrar el módulo Nexa. En esta curva aparece representado en

el eje de abscisas los valores netos de la intensidad de salida, aumentando estos de cinco en cinco amperios hasta una intensidad máxima de 35 A y en el eje de ordenadas, se representa la potencia generada por la pila expresada en vatios.

A partir de los valores de la tabla 6.6, donde se comparan los valores de potencia teóricos frente a los obtenidos con el software NexaMon y con nuestros instrumentos de medida, se han representado las tres curvas:

- Curva de potencia, proporcionada por el manual de Ballard de la pila Nexa.(Azul)
- Curva de potencia, obtenida a través de Software NexaMon. (Rojo)
- Curva de potencia, obtenida con nuestros instrumentos de medida: pinza amperimétrica y multímetro.(Amarilla)

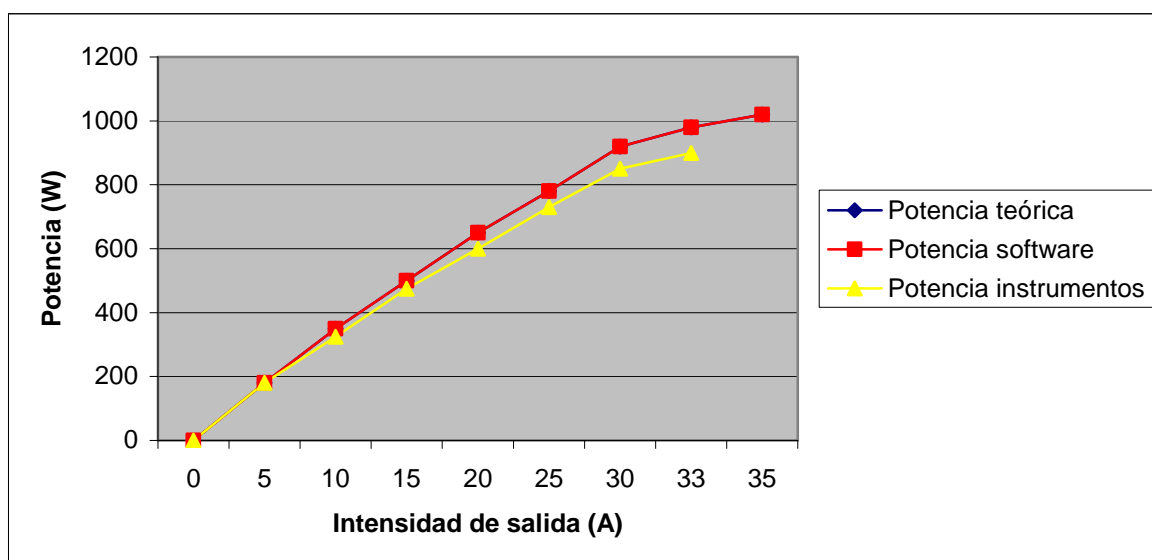


Figura 6.8.- Curva de Potencia. (Las curvas de la potencia teórica y la del software aparecen superpuestas)

Tras los resultados obtenidos, vemos que los valores proporcionados por el fabricante Son idénticos a los obtenidos con el software NexaMon, por tanto las curvas se superponen. Sin embargo, no hemos podido obtener los resultados de la potencia máxima de la pila, debido a que solo hemos podido conectar un máximo de siete bombillas, lo que supone una demanda de 1050 W, lo que nos sitúa 150 W por debajo de la potencia teórica del módulo Nexa.

La curva que hemos obtenido empleando nuestro multímetro y nuestra pinza amperimétrica, nos ha dado un valor máximo de 900 W (con siete bombillas accionadas, al accionar la octava, no se producía ningún incremento) para una intensidad de salida de 33 A, lo que supone una diferencia de 300 W respecto a la potencia máxima teórica de la pila.

INTENSIDAD (A)	POTENCIA (W)			% ERROR	
	TEÓRICO	EN SOFTWARE	CON INSTRUMENTOS	SOFTWARE	INSTRUMENTOS DE MEDIDA
0	0	0	0	0	0.0
5	180	180	180	0	0.0
10	350	350	325	0	7.1
15	500	500	475	0	5.0
20	650	650	600	0	7.7
25	780	780	730	0	6.4
30	920	920	850	0	7.6
33	980	980	900	0	7.2
35	1020	1020	-	0	-
% ERROR MEDIO				0	5.1

Tabla 6.6.- Comparación de los valores de potencia teóricos, con los obtenidos en el software NexaMon y los obtenidos con nuestros instrumentos de medida.

En la tabla 6.7, se realiza una comparación entre la potencia teórica (115 W / lámpara), la obtenida en el software NexaMon y la obtenida experimentalmente en función del número de bombillas conectadas. Con esto lo que pretendemos es asegurarnos que los datos correctos son los experimentales y no los obtenidos con el software NexaMon. Utilizando 115 W teóricos, más el valor residual de cada una, podemos observar cual de las dos mediciones se ajusta más.

Nº de Bombillas encendidas	POTENCIA (W)		
	Teórica acumulada	Media en el Software	Media Experimental
0	Valor residual	60	32
1	115	215	160
2	230	380	300
3	345	510	430
4	460	680	550
5	575	810	680
6	700	950	820
7	815	1050	900

Tabla 6.7.- Comparación de los valores de potencia teórica, potencia en el software NexaMon y potencia obtenida con nuestros instrumentos de medida, en función del número de bombillas en funcionamiento.

En los resultados obtenidos, se puede ver que la aproximación con respecto a la potencia teórica, es mayor en el caso de la potencia obtenida con la medida experimental que la obtenida con el software NexaMon. Además, nuestros valores experimentales quedan aun más validados, si tenemos en cuenta que en todo circuito eléctrico, existen pérdidas adicionales aparte del valor residual del arranque de la pila (cuando ninguna lámpara esta encendida), que no son tenidas en cuenta por los valores de la potencia teórica.

Curva de calor disipado.

La potencia total se divide en dos, la entregada al sistema (calculada en el punto anterior) y la potencia calorífica disipada. Para poder calcular esta potencia total, debemos conocer los datos de consumo de hidrógeno y el Poder Calorífico Inferior (PCI) del Hidrógeno el cual tiene un valor de 120MJ/Kg.

$$Potencia\ Total\ (W) = \dot{m}\ (Kg/s) \times PCI\ (Julios/Kg)$$

Una vez conocida la potencia total, si le restamos la potencia entregada al sistema, podemos obtener los valores de la potencia disipada o lo que es lo mismo, el calor disipado.

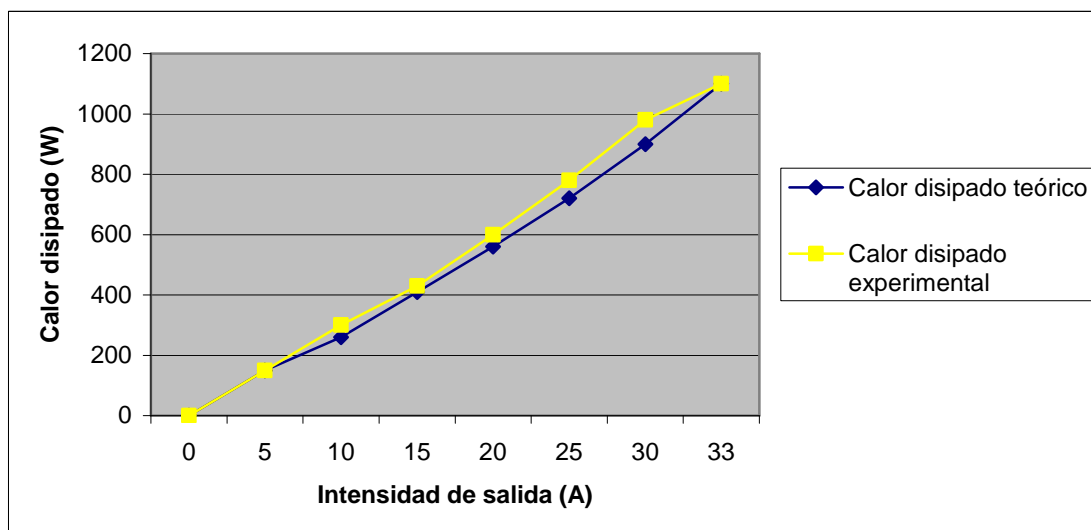


Figura 6.9.- Curva de calor disipado obtenida experimentalmente y curva proporcionada por el manual de la pila Nexa.

INTENSIDAD (A)	CALOR DISIPADO (W)		% ERROR
	TEÓRICO	EXPERIMENTAL	
0	0	0	0.00
5	150	150	0.00
10	260	300	13.30
15	410	430	4.60
20	560	600	6.60
25	720	780	7.70
30	900	980	8.16
33	1100	1100	0.00
% ERROR MEDIO			5.00

Tabla 6.8.- Comparación de los valores de calor disipado proporcionados por el manual de la pila Nexa y los obtenidos de manera experimental.

En la figura 6.9, aparece representada la curva del calor disipado experimental y la curva de calor teórica proporcionada en el manual de la Pila Nexa. En el eje de abscisas aparecen los valores netos de la intensidad de salida, hasta un valor máximo de 33 A y en el eje de ordenadas, se representan los valores del calor disipado (tabla 6.8), expresado en vatios. Se puede observar que los valores de ambas curvas están muy próximos

Curva de eficiencia.

En la figura 6.10 aparece representada la curva de eficiencia teórica obtenida del manual de la Pila Nexa y la curva de eficiencia experimental. Esta última, se obtiene del cociente de la potencia neta entregada, respecto a la potencia total calculada (la neta más la calorífica). Los valores empleados para la representación de las curvas se muestran en la tabla 6.9, como se puede apreciar, los datos facilitados por el fabricante y los obtenidos experimentalmente, apenas difieren.

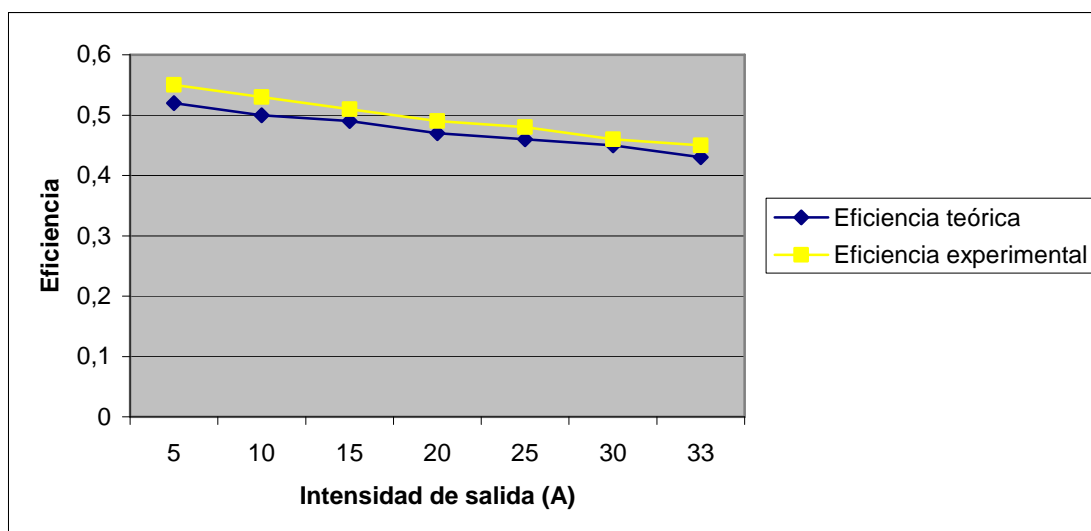


Figura 6.10.- Curva de eficiencia obtenida experimentalmente y proporcionada por el manual de la pila Nexa.

INTENSIDAD (A)	EFICIENCIA		% ERROR
	TEÓRICO	EXPERIMENTAL	
5	0.52	0.55	5.5
10	0.50	0.53	5.6
15	0.49	0.51	3.9
20	0.47	0.49	4.1
25	0.46	0.48	4.2
30	0.45	0.46	2.2
33	0.43	0.45	4.5
% ERROR MEDIO			4.3

Tabla 6.9.- Comparación de los valores de eficiencia proporcionados por el fabricante y los obtenidos experimentalmente.

Curva de Nivel Sonoro.

Como en los casos anteriores, para la verificación de los datos de nivel sonoro de la pila facilitados por el fabricante, se partió de la curva de ruido proporcionada en el manual de la pila Nexa, la cual se obtuvo realizando las mediciones a un metro de distancia y a una temperatura de 21°C. Para la obtención de la curva experimental nos ayudamos del sonómetro. Ambas curvas aparecen representadas en la figura 6.11.

Los valores empleados para la representación de las curvas se muestran en la tabla 6.10, como se puede apreciar, los datos facilitados por el fabricante y los obtenidos experimentalmente difieren de media en un 15%, mostrándose la Pila Nexa más ruidosa en la realidad.

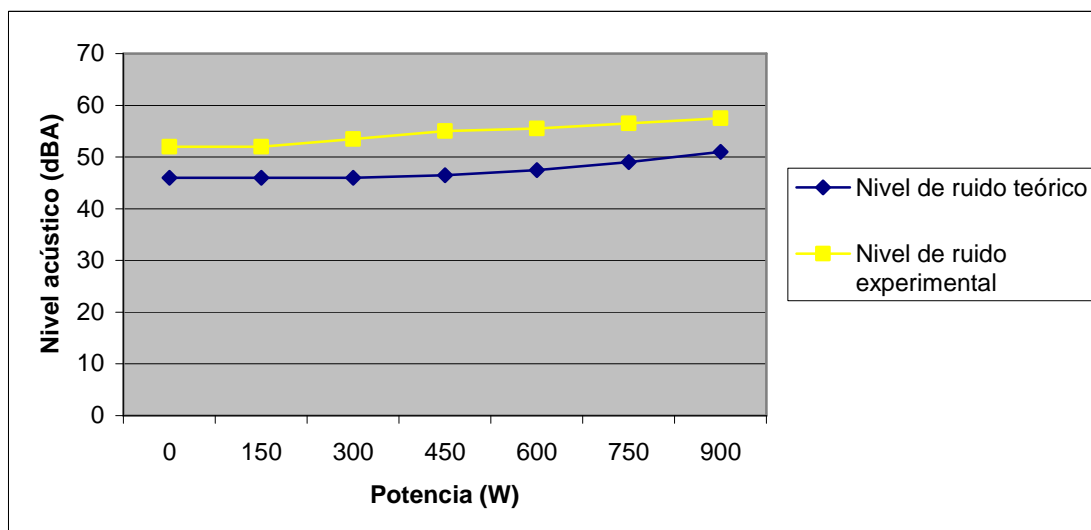


Figura 6.11.- Curva de ruido obtenida experimentalmente y proporcionada por el manual de la pila Nexa.

POTENCIA (W)	RUIDO (dBA)		% ERROR
	TEÓRICO	EXPERIMENTAL	
0	46.0	52.0	13.0
150	46.0	52.0	13.0
300	46.0	53.5	16.3
450	46.5	55.0	18.3
600	47.5	55.5	16.8
750	49.0	56.5	15.3
900	51.0	57.5	11.3
% ERROR MEDIO			14.9

Tabla 6.10.- Comparación de los valores de ruido proporcionados por el fabricante y los obtenidos experimentalmente.

6.2.3.- Análisis de resultados.

De los resultados obtenidos, posemos concluir que la potencia generada por la Pila en nuestros ensayos no supero los 900 W, estando este valor un 25% por debajo de la potencia (1200 W) que debería suministrar la Pila según las especificaciones del fabricante. En los momentos que se supero esta barrera de 900W, se produjo un fallo en la regulación desestabilizando el sistema y obligando a reducir la potencia hasta los 800 W, momento en el cual vuelve a estabilizarse el sistema.

Debido a esta diferencia entre la potencia máxima obtenida experimentalmente (900 W) y la indicada por el software NexaMon (1020 W), este software no puede considerarse como una fuente fiable de datos, a pesar de que los valores obtenidos por ambas curvas hasta los 900 W, tan solo difieren en un porcentaje inferior al 5%.

Los valores de voltaje, consumo de hidrógeno, potencia, calor disipado y eficiencia, obtenidas experimentalmente difieren en un porcentaje inferior al 10% de los proporcionados en el manual de la Pila Nexa por el fabricante. Esta diferencia, puede ser fácilmente achacable a cualquier proceso de medida. No obstante, estos valores para la generación de las curvas, solo hemos podido obtenerlas de modo experimental hasta un límite máximo de 33 A, que se corresponde con el valor experimental máximo de potencia de la pila de 900 W.

En cuanto a la curva de nivel acústico, la diferencia entre los valores obtenidos y los entregados por el fabricante, difieren en mayor medida, llegando a ser los obtenidos a través del sonómetro un 15 % superior a los teóricos.

6.3.- TERCER BLOQUE DE ENSAYOS EN EL LABORATORIO.

En este tercer bloque de ensayos se emplearon resistencias calibradas, para obtener la curva de potencia de la pila de combustible Nexa. Estas resistencias calibradas están provistas de un disipador, que evita que los valores de resistencia se vean modificados como consecuencia del calentamiento de estas.

6.3.1.- Circuito con asociación de resistencias calibradas.

En un primer momento, se pensó en emplear resistencias que nos generarán cargas desde 100W hasta 1200 W escalonadas de cien en cien, para alcanzar de manera progresiva la potencia teórica máxima que es capaz de suministrar la pila Nexa. Los valores de las resistencias necesarios para generar estas cargas aparecen representados en la tabla 6.11. Los cálculos se realizaron partiendo de la tensión de salida fijada en el regulador DC/CD que se corresponde con 27 V y la potencia para cada caso.

A partir de $P = V \cdot I$ y $I = V/R$ obtenemos $R = V^2/P$

POTENCIA	RESISTENCIA
100 W	7.29 Ω
200 W	3.64 Ω
300 W	2.43 Ω
400 W	1.82 Ω
500 W	1.46 Ω
600 W	1.21 Ω
700 W	1.04 Ω
800 W	0.91 Ω
900 W	0.81 Ω
1000 W	0.73 Ω
1100 W	0.66 Ω
1200 W	0.61 Ω

Tabla 6.11.- Valor de las resistencias necesarias para generar las diferentes cargas.

Una vez obtenidos los valores de las resistencias necesarias, se nos plantea el problema de establecer los distintos escalones de potencia en base a las resistencias disponibles en nuestro laboratorio, las cuales son:

- De 1 Ω y 3 Ω con una potencia máxima admisible de 150 W.
- De 10 Ω , 22 Ω , 33 Ω , 47 Ω y 100 Ω con una potencia máxima admisible de 300 W.

RESISTENCIA (Ω)	(I) Potencia máxima obtenida (W)	Potencia máxima admisible (W)	Observaciones
1	729	150	Se supera la potencia máxima admisible
3	220,91	150	Se supera la potencia máxima admisible
10	72,9	300	
22	33,14	300	
33	22,091	300	
47	15,51	300	
100	7,29	300	

Tabla 6.12.- Valores de potencia para las resistencias del laboratorio.

Como se puede apreciar en la tabla 6.12, las resistencias de 1 y 3 Ω , superan la potencia máxima admisible, además con ninguna de ellas obtenemos valores de carga superiores a 729 W, esto nos obliga a colocarlas en asociación. De este modo conseguimos también disipar valores de potencia inferiores a los máximos admisibles.

Las asociaciones creadas se han realizado tratando de alcanzar valores lo más próximos posibles a las cargas planteadas inicialmente. A continuación se muestran las siete agrupaciones realizadas, en cada una de ellas se indica la resistencia obtenida y la potencia estimada para los 27 VDC que entrega el regulador DC/DC.



Figura 6.12.- Resistencia 8 Ω y Potencia 91.12 W

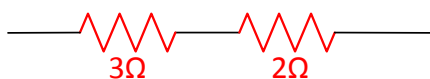


Figura 6.13.- Resistencia 5 Ω y Potencia 145.80 W

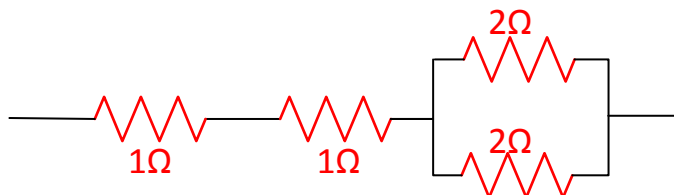


Figura 6.14.- Resistencia 3 Ω y Potencia 243.00 W

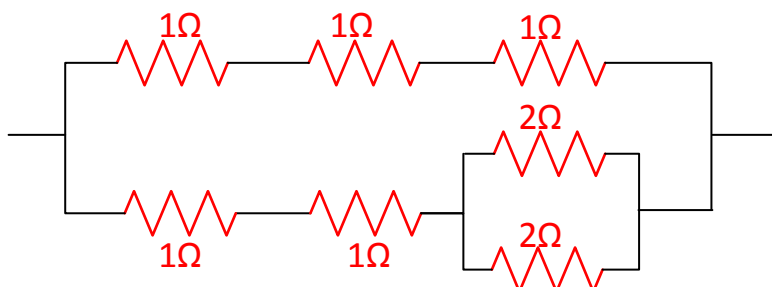


Figura 6.15.- Resistencia 1.5 Ω y Potencia 486.00 W

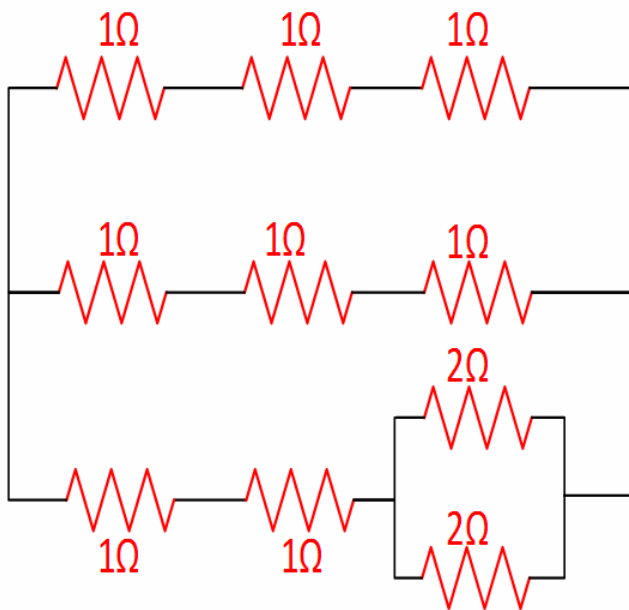


Figura 6.16.- Resistencia 1Ω y Potencia 729.00 W

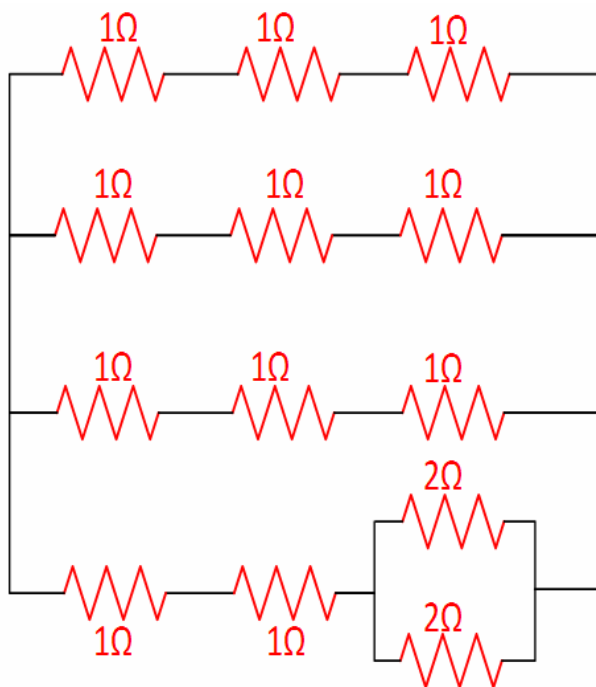


Figura 6.17.- Resistencia 0.75Ω y Potencia 972.00 W

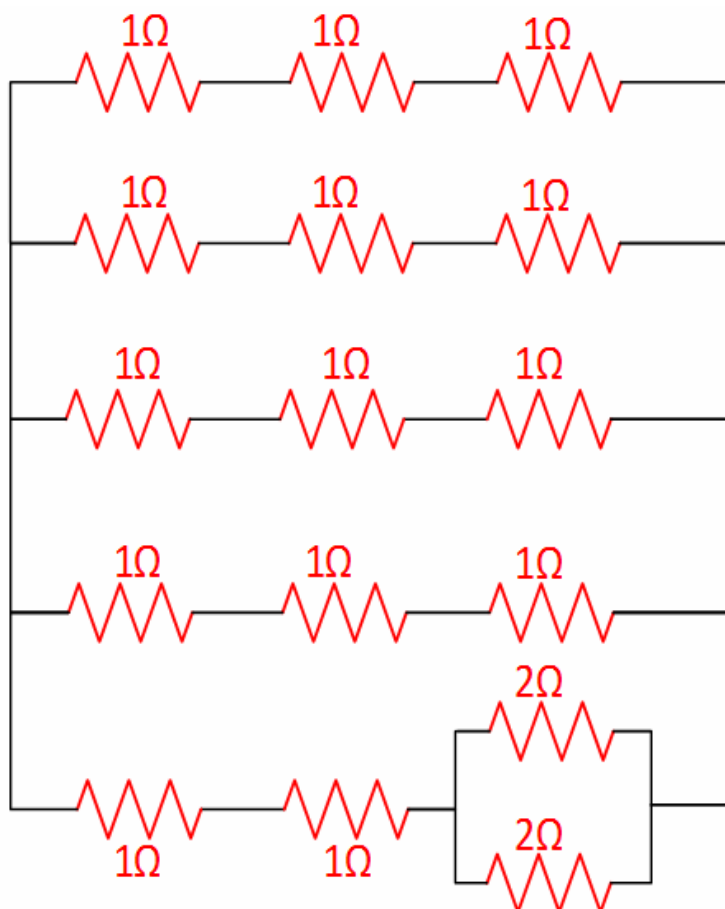


Figura 6.18.- Resistencia $0.6\ \Omega$ y Potencia $1215\ W$

Para la construcción de estos circuitos de resistencias, se partió de una chapa de aluminio de $4\ mm$ de espesor, sobre la que atornillaron directamente las resistencias, consiguiendo de este modo aumentar el efecto de disipación de calor. Se colocaron un total de 21 resistencias (figura 6.19) unidas por hilo de cobre de sección $2.5\ mm^2$, de las cuales catorce son de $1\ \Omega$, cuatro de $2\ \Omega$ y dos de $3\ \Omega$. Esta disposición, nos permitió realizar de un modo rápido las conexiones de las agrupaciones de resistencias, durante los ensayos con la pila.

Tanto el empleo de hilo de cobre, como las soldaduras de unión entre este y las resistencias mediante el empleo de estaño, nos generaron una resistencia adicional. Esta resistencia adicional es fácilmente cuantificable en el caso del hilo de cobre, a través de la fórmula:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ = Resistividad (Ω/m)
 L = Longitud del hilo. (m)
 S = Sección del hilo. (mm^2)

Conocida la resistividad del cobre que es de $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$, la sección del hilo que es de 2.5 mm^2 y la longitud del hilo que es de aproximadamente 3 m, obtenemos un valor de resistencia generado por el hilo de cobre de 0.002Ω , lo que supone un aumento de resistencia del 5% en el caso más desfavorable, al trabajar con la asociación de resistencias de valor 0.6Ω .

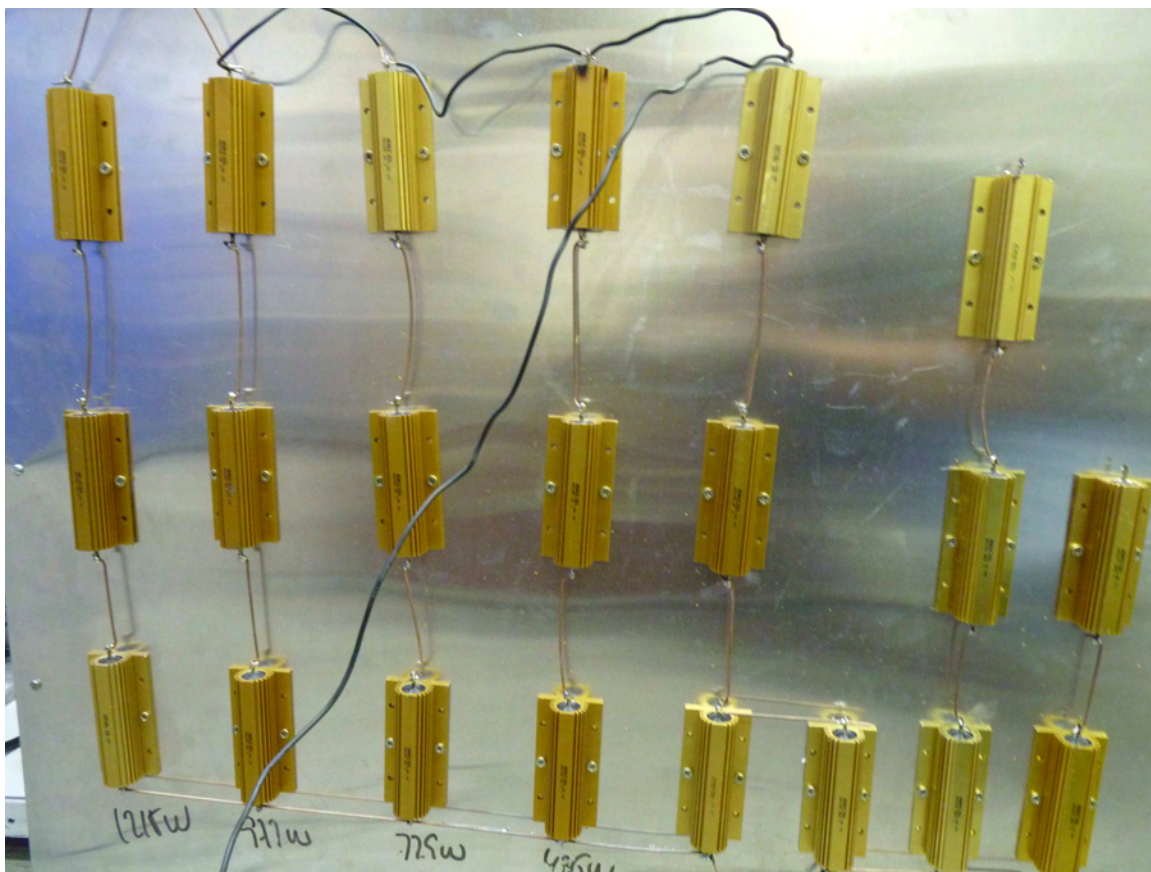


Figura 6.19.- Resistencias calibradas con disipador.

En el caso de los puntos de soldadura, no hemos podido cuantificar el aumento de resistencia ni teórica, ni experimentalmente, ya que en este último caso el equipo de medida (ohmímetro) que disponíamos carecía de suficiente apreciación. A pesar de ello, para el caso más desfavorable (1215 W), para una intensidad de 34.9 A, la caída de tensión esta próxima a 1 V y la potencia absorbida por la resistencia es de 35 W, lo que supone un valor inferior al 5% de la potencia total.

6.3.2.- Ensayos realizados con la asociación de resistencias calibradas.

Para la realización de los ensayos, se tomaron los valores de intensidad y tensión a la salida de la pila Nexa (medida en el monitor de la Pila), a la salida del regulador DC/DC (medida en el monitor de la Pila) y las obtenidas con nuestro equipo de medición (amperímetro y

voltímetro) a la salida del regulador. Los resultados obtenidos, se muestran en la tabla 6.13 (Primer ensayo) y la tabla 6.15 (Segundo ensayo).

Estos datos obtenidos de tensión e intensidad, nos permitieron calcular la potencia teórica, para una tensión de 27 V ($P = V^2/R$), la entregada por el Stack de la Pila Nexa, la proporcionada a la salida del regulador DC/DC y la absorbida por la asociación de resistencias calibradas. La Tabla 6.14 y 6.16, muestran los datos de las potencias obtenida en el primer y segundo ensayo. En las figuras 6.20 y 6.21, se representan las curvas de potencia de los dos ensayos realizados.

PRIMER ENSAYO		Pila Nexa		Regulador			Instrumentos de medida	
RESISTENCIA (Ω) Y POTENCIA (w)		Voltaje (V)	Intens. (A)	Voltaje entrada (V)	Voltaje salida (V)	Intens. (A)	Voltaje (V)	Intens. (A)
8 Ω	91.12 W	35.9	7.4	34.60	27.0	7.8	26.5	3.20
5 Ω	145.80 W	35.0	8.5	33.70	27.0	8.8	26.5	4.85
3 Ω	243.00 W	33.9	11.4	32.80	27.0	12.0	25.8	8.22
1.5 Ω	486.00 W	31.1	19.7	30.60	27.0	19.5	25.6	16.11
1 Ω	729.00 W	29.6	26.9	29.10	27.0	25.8	23.2	25.37
0.75 Ω	972.00 W	28.6	29.9	27.50	25.9	29.0	21.8	29.83
0.6 Ω	1215.00 W	28.7	29.6	27.83	25.8	32.8	20.8	34.90

Tabla 6.13.- Valores de intensidad y voltaje de las asociaciones de resistencias calibradas.

PRIMER ENSAYO	POTENCIA (W)			
RESISTENCIA	TEÓRICA (27 V)	GENERADA POR LA PILA	A LA SALIDA DEL REGULADOR	ABSORBIDA POR LAS RESISTENCIAS
8 Ω	91.12	265.66	210.60	84.80
5 Ω	145.80	297.50	237.60	128.53
3 Ω	243.00	386.46	324.00	212.08
1.5 Ω	486.00	612.70	526.50	412.42
1 Ω	729.00	796.24	696.60	588.58
0.75 Ω	972.00	855.14	751.00	650.29
0.6 Ω	1215.00	849.52	846.24	725.92

Tabla 6.14.- Valor de la potencia para las cargas de las asociaciones de resistencias calibradas.

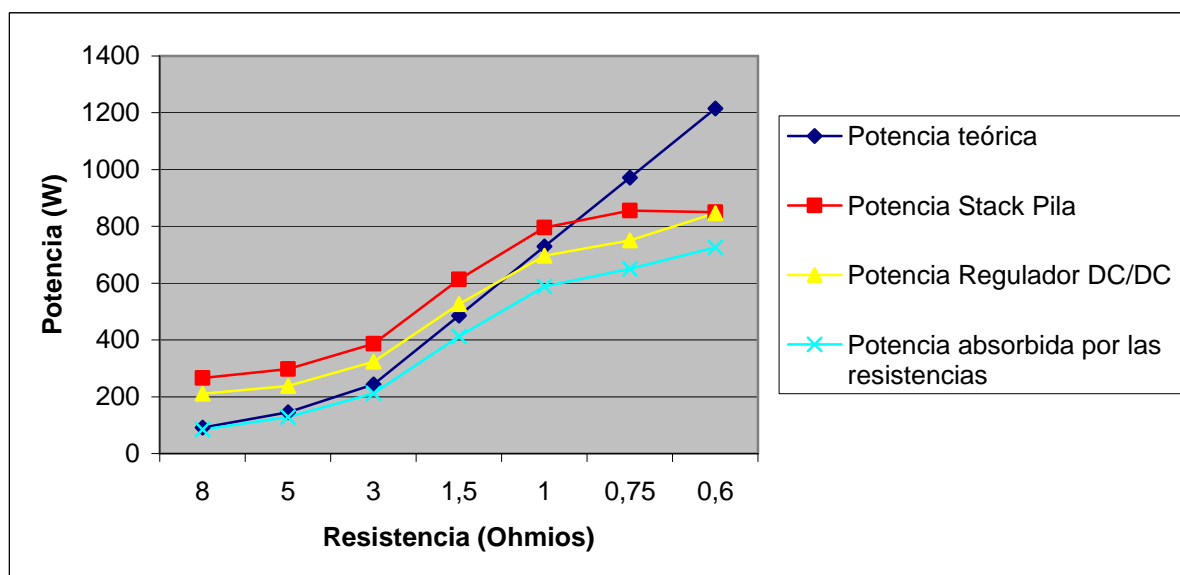


Figura 6.20.- Curvas de Potencia. Primer ensayo.

SEGUNDO ENSAYO		Pila Nexa		Regulador			Instrumentos de medida	
RESISTENCIA (Ω)	Y	Voltaje (V)	Intens. (A)	Voltaje entrada (V)	Voltaje salida (V)	Intens. (A)	Voltaje (V)	Intens. (A)
POTENCIA (w)								
8 Ω	91.12 W	38.0	4.0	34.60	27.0	4.2	25.5	1.88
5 Ω	145.80 W	36.9	5.5	35.40	27.0	5.9	25.4	3.99
3 Ω	243.00 W	35.2	9.0	33.90	27.0	9.6	25.2	7.90
1.5 Ω	486.00 W	32.1	17.5	30.30	27.0	17.9	24.7	15.25
1 Ω	729.00 W	30.1	26.7	28.50	27.0	26.5	24.2	26.72
0.75 Ω	972.00 W	28.7	33.7	27.10	25.6	31.2	23	29.74
0.6 Ω	1215.00 W	28.8	29.2	28.5	24.4	26.2	20.4	30.05

Tabla 6.15.- Valores de intensidad y voltaje de las asociaciones de resistencias calibradas.

SEGUNDO ENSAYO	POTENCIA (W)			
	RESISTENCIA	TEÓRICA (27 V)	GENERADA POR LA PILA	A LA SALIDA DEL REGULADOR
8 Ω	91.12	152.00	113.40	47.81
5 Ω	145.80	203.00	159.30	101.35
3 Ω	243.00	317.00	259.00	199.18
1.5 Ω	486.00	561.80	483.30	376.67
1 Ω	729.00	803.70	715.00	646.62
0.75 Ω	972.00	967.00	798.7	684.02
0.6 Ω	1215.00	841.00	695.4	613.12

Tabla 6.16.- Valor de la potencia para las cargas de las asociaciones de resistencias calibradas.

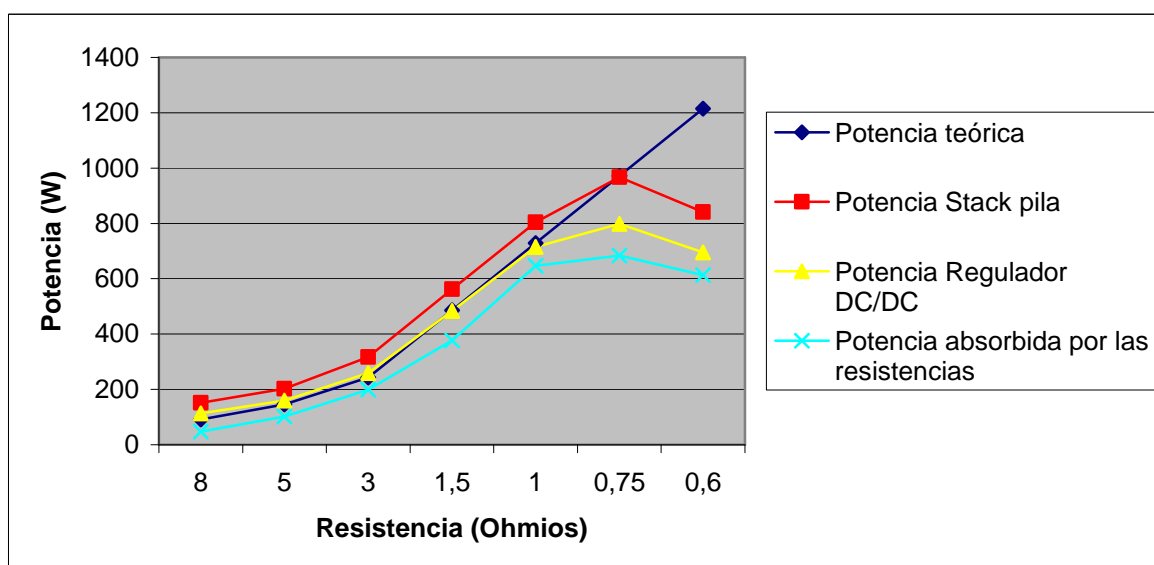


Figura 6.21.- Curvas de Potencia. Segundo ensayo.

6.3.3.- Análisis de resultados.

Los resultados obtenidos en ambos ensayos, nos muestran que para potencias inferiores a 729 W, la tensión de salida del regulador DC/DC, se mantiene estable en un valor de 27 V, pero en el momento en que se sobrepasa esta potencia, la tensión de salida disminuye y deja de ser estable, para comenzar a fluctuar.

Por otro lado, mientras se mantiene estable la tensión de salida del regulador (27 v), se puede observar como el valor de la potencia a la salida del Stack de la Pila es superior en todo momento al valor teórico suministrado por el manual de la pila Nexa y a su vez ligeramente superior (en torno a un 5 %) al valor de potencia a la salida del regulador DC/DC. Esto es debido a que la pila en vacío, sin estar conectada al banco de resistencias, consume en torno a 1 Amperio (valor obtenido de la pantalla del monitor) para consumo de auxiliares, pero a medida que aumenta la demanda de potencia, el consumo se incrementa, debido a las mayores exigencias requeridas: Compresor de aire, humidificador, etc. Por tanto, para valores inferiores a 729 W, el rendimiento de la pila de combustible Nexa es el esperado.

Para potencias superiores a los 729 W, es decir a partir del momento en que conectamos la pila a la asociación de resistencias de valor 0.75Ω , la potencia de salida, tanto en el Stack de la pila como a la salida del regulador DC/DC, caía bruscamente respecto al valor teórico.

La potencia máxima (967 W) entregada por el stack de la pila se produce en el segundo ensayo (855.14W en el primer ensayo), cuando esta se encuentra conectada a la asociación de resistencias de 0.75Ω , generando una potencia máxima de 855.14W en el primer ensayo y 967 W en el segundo ensayo, lo que supone una pérdida de potencia entre un 22% y un 30% respecto al valor teórico (1215 W) suministrado por el fabricante.

En el caso de la pérdida de potencia a la salida del regulador DC/DC, se podría pensar que es debido a que el Módulo NEXA entra en la fase de carga de baterías, pero esto no es así, ya que la potencia entregada por el stack también se mantiene muy por debajo de los valores suministrados por el fabricante, además, en los dos ensayos realizados, se produjo la caída de potencia en el mismo instante, al conectar la asociación de resistencias de 0.75Ω .

En ambos ensayos, los valores de potencia obtenidos mediante la toma de datos con nuestros equipos de medición en el banco de resistencias, ha sido menor a la potencia entregada a la salida del regulador DC/DC. Esto puede estar motivado por una caída de tensión provocada en los puntos de unión de las resistencias con los cables, ya que son de poca sección, pudiendo dar lugar a pérdidas de potencia cuando trabajamos con altas intensidades. También es importante tener en cuenta que esta diferencia entre los valores obtenidos puede estar motivada por la falta de calibración de nuestros equipos de medida.

6.4.- CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LOS ENSAYOS EN EL LABORATORIO.

Los ensayos realizados en el laboratorio con la Pila Nexa, nos han permitido demostrar que es viable su uso tanto para alimentar la línea de propulsión como la línea de consumos auxiliares. Además, el rendimiento de este sistema es muy superior a los convencionales para generar energía a bordo (motores de combustión), aunque a día de hoy sale económicamente

más caro, ya que el precio del hidrógeno como combustible es muy superior al de los hidrocarburos.

Durante los ensayos realizados, el módulo Nexa, no ha producido ningún tipo de emisiones contaminantes, ni vibraciones, y el nivel acústico generado por la pila ha sido incluso menor que el declarado por el fabricante. Esto va a permitir el uso de esta tecnología en zonas marinas protegidas de emisiones cero, una vez este el sistema implantado en la embarcación.

Además, es destacable la velocidad de respuesta instantánea del sistema de pila de combustible PEM a variaciones en la demanda de carga externa provocadas por la modificación de los requerimientos de potencia.

Sin embargo, se ha detectado un importante déficit de potencia con respecto a la potencia máxima de 1200W que debería suministrar la pila según los datos del fabricante. En los ensayos realizados con la asociación de lámparas, se obtuvo una potencia máxima de 900W y en los ensayos realizados con las resistencias calibradas, la potencia máxima medida con nuestros instrumentos fue en el mejor de los casos de 725 W, lo que supone un descenso del 25% en el primer caso y un 40% en el segundo caso, respecto a la potencia declarada por el fabricante. Esta diferencia deberá ser tenida en cuenta, a la hora de implantar esta tecnología en una embarcación real (dimensiones y prestaciones), ya que si pretendemos equipar la embarcación con un motor de 1.2 KW, solo podremos acercarnos en momentos puntuales a esa potencia, gracias al empleo del rack de baterías.

También es preocupante el desfase existente entre los datos obtenidos experimentalmente y los mostrados por el software NexaMon de la pila proporcionado por la empresa Ballard.

Para la implantación de este sistema en una embarcación, aún debemos abordar muchos problemas, entre los que se encuentran, el comportamiento de la pila en un ambiente marino altamente corrosivo o ante los balances que se pueden producir en la embarcación, así como el problema del almacenaje del hidrógeno desde el punto de vista de la seguridad.

Capítulo 7: Aplicación de la pila PEM de combustible en una embarcación.

7.1.- INTRODUCCIÓN.

El objetivo de este proyecto, es desde un primer momento, la aplicación de la tecnología de la pila PEM de combustible como sistema alternativo de propulsión o de generación energética auxiliar en una embarcación, que nos permita la utilización de la misma en zonas marinas protegidas de emisiones cero, tanto en lo referente a contaminación acústica como ambiental.

Para esto, se ha diseñado y construido una pequeña embarcación híbrida denominada “Barco 00” que puede ser propulsada indiferentemente por un motor diesel o por un motor eléctrico. El motivo de incluir en la misma un motor diesel, es debido a la normativa de seguridad impuesta por Capitanía Marítima para la homologación y matriculación de la embarcación, ya que exige además de la propulsión eléctrica generada por la pila de combustible con tecnología de hidrógeno de baja temperatura PEM (membrana polimérica de intercambio de protones), otro sistema que garantice la propulsión de la embarcación.

Como complemento al proyecto, se han incluido dos placas solares fotovoltaicas de tecnología policristalina para garantizar la máxima autonomía eléctrica de la embarcación, al mismo tiempo que se ha incluido un alternador adicional acoplado al motor diesel que alimenta las baterías AGM (electrolito absorbido en matriz porosa de fibra de vidrio) de propósito marino, durante la navegación con diesel.

Estas baterías, también pueden ser recargadas mediante una toma de tierra, cuando la embarcación se encuentra atracada en puerto. El objetivo es salir a navegar siempre con el mayor suministro de energía eléctrica posible.

Para realizar la gestión de todo el sistema y los equipos, se ha diseñado, construido y ensayado un gestor de potencia que actúa sobre los flujos de energía entre los sistemas eléctricos de almacenamiento y recarga, para evaluar energéticamente el comportamiento del sistema y optimizar el dimensionado de los equipos. En la figura 7.1, se muestra mediante un diagrama de flujo el esquema general de la instalación.

El gestor de potencia, utiliza la energía (corriente continua a 24V) suministrada por la pila NEXA (1200W), por el alternador “extra” acoplado a la toma de fuerza del motor diesel Mitsubishi-Solé (100W) y la procedente de los paneles solares fotovoltaicos (360W), para realizar la carga de las baterías AGM. Estas a su vez, alimentan al inversor Victrón con una corriente de 24 VDC, el cual convierte a 220 VAC a 50 Hz que envía al variador OMRON. Por último, el variador convierte la energía monofásica recibida en corriente a 220 VDC a 50 Hz trifásica, que emplea para la alimentación del motor eléctrico Siemens de propulsión.

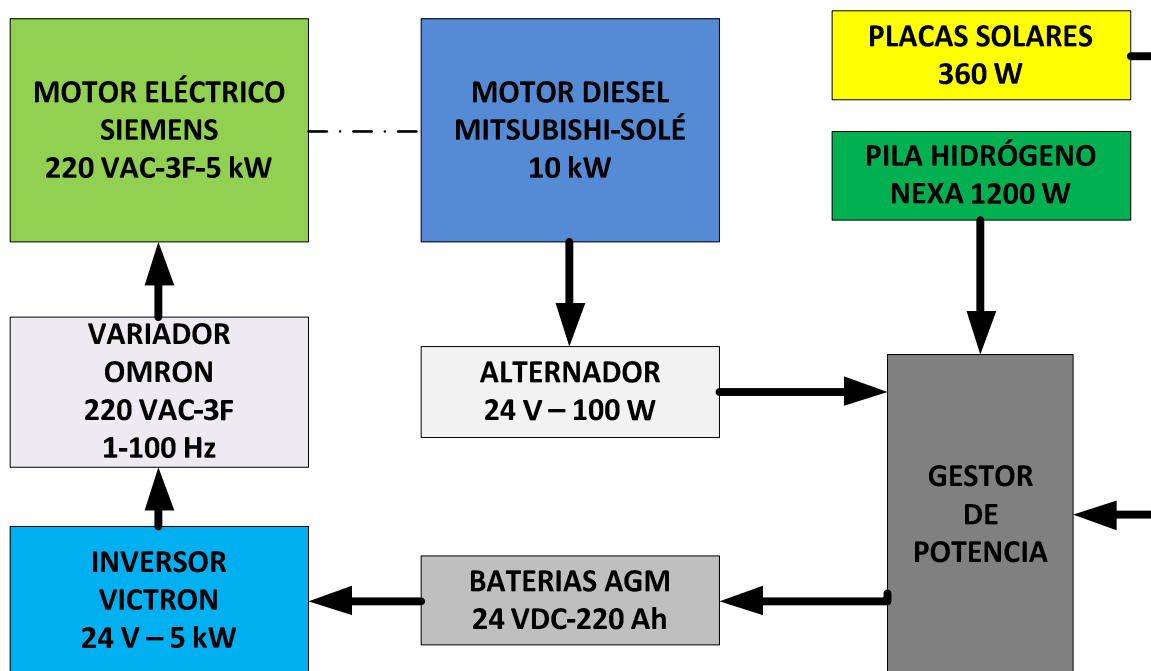


Figura 7.1.- Esquema general de la instalación.

7.2.- LEGISLACIÓN APLICABLE AL USO DEL HIDRÓGENO EN EL SECTOR MARÍTIMO.

En el marco de esta actividad se realizó una búsqueda bibliográfica de la reglamentación y de los estándares aplicables a la integración de hidrógeno y pilas de combustible en el sector marítimo, observándose la ausencia de reglamentación y normativa específica para ésta aplicación en concreto.

Para el caso de aplicaciones del hidrógeno en el sector automovilístico ya existe el Reglamento (CE) n° 79/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de enero de 2009, relativo a la homologación de los vehículos de motor impulsados por hidrógeno y que modifica la Directiva 2007/46/CE. Este reglamento CE 79/2009 establece los requisitos para la homologación de vehículos de motor respecto a la propulsión por hidrógeno y la homologación de los componentes y sistemas de hidrógeno.

Además establece los requisitos para la instalación de dichos componentes y sistemas. Algunos de los requisitos comunes que se exigen a los componentes y sistemas de hidrógeno son:

- Ser resistentes a las condiciones eléctricas, mecánicas, térmicas y químicas de funcionamiento.
- Ser resistentes a las temperaturas y presiones previsibles durante su vida útil.
- Ser resistentes al intervalo de temperaturas de funcionamiento establecido en las medidas de ejecución.

- Estar diseñados de forma que puedan instalarse de conformidad con los requisitos del Anexo VI referente a “Requisitos para la instalación de los componentes y sistemas de hidrógeno”.
- Estar fabricados de materiales compatibles con el hidrógeno.
- Ser interoperables con las estaciones que suministran hidrógeno.

Ante la escasez de reglamentación y normativa, se recopilaron en el marco de esta actividad distintos estándares aplicables al manejo y uso seguro del hidrógeno. Los estándares se basan en criterios técnicos en los cuales se puede alcanzar los objetivos de seguridad. Se marcan con el consenso de las industrias relacionadas, y son voluntarios, a diferencia de la reglamentación que es de obligado cumplimiento. En las tecnologías emergentes como el caso del hidrógeno, la estandarización puede preceder a la regularización, ya que la creación de nuevas legislaciones, lleva tiempo y requiere un considerable conocimiento de la tecnología.

El trabajo de estandarización en tecnologías del hidrógeno se lleva fundamentalmente a cabo a nivel internacional, estando implicadas la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC). La mayoría de los temas relacionados las tecnologías de hidrógeno está llevada a cabo por el Comité Técnico ISO/TC 197, cuyo objetivo es la normalización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, medición y uso del hidrógeno. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) es la organización que prepara y publica la normativa internacional para todos los temas relacionados con la electricidad, electrónica y tecnologías relacionadas. Algunos ejemplos de estándares desarrollados son:

- ISO/DIS 17268: Hidrógeno gaseoso - Conectores para carga de combustible para vehículos terrestres.
- ISO/DIS 15869 1/2/3/4/5: Hidrógeno gaseoso y mezclas de H₂ gaseoso - Tanques de combustible para vehículos terrestres.
- ISO/WD 20012: Hidrógeno gaseoso – Estaciones de Abastecimiento.

La legislación europea exige que la normativa europea sea trasladada a cada uno de los países miembros, por este motivo, las normas elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) o por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI) son incorporadas sistemáticamente al catálogo de AENOR alcanzando la categoría de normas nacionales.

En España, es el Comité Técnico de Normalización AEN/CTN 181 en Tecnologías del Hidrógeno de AENOR quien regula la normativa vigente, adaptando las normas aprobadas a nivel europeo y colaborando con el Comité internacional de normalización en hidrógeno IEC/TC 197.

- UNE-ISO 14687:2006: Hidrógeno como combustible. Especificaciones de producto. (ISO 14687:1999 + ISO 14687:1999/Cor. 1:2001).
- UNE-ISO/TR 15916:2007 IN: Consideraciones básicas de seguridad de los sistemas de hidrógeno. (ISO/TR 15916:2004).

Ante la ausencia de normativa específica para el sector marítimo, nos pusimos en contacto con la sociedad de clasificación Germanischer Lloyd. Esta sociedad de clasificación posee experiencia en aplicaciones marítimas de pilas de combustible, ya que participó en el proyecto europeo ZEMSHIP, cuyo objetivo era desarrollar una embarcación de pasajeros con pila de combustible alimentada con hidrógeno. Esta sociedad de clasificación ha desarrollado unas reglas de clasificación para garantizar la seguridad en embarcaciones con pila de combustible.

Estas reglas se aplican para el uso de sistemas de pila de combustible instaladas permanentemente en barcos y describen los requerimientos técnicos para garantizar la operación segura de estos sistemas. Se deberá demostrar que:

- El sistema de pila de combustible opere de forma segura cuando se usa para el propósito previsto, incluyendo las operaciones de mantenimiento.
- Los fallos en la operación puedan preverse gracias al monitoreo, alarma y uso de equipos de protección.
- Las situaciones peligrosas que puedan surgir se mantengan bajo control y que sus efectos sean limitados por la aplicación de medidas adecuadas de protección.

Los aspectos que se analizan para la certificación son los materiales implicados, el sistema de hidrógeno (repostaje, almacenamiento, condicionamiento y distribución), las pilas de combustible y sus componentes asociados, sistemas de ventilación, sistemas de extinción de incendios, protección de explosiones, sistemas de control, regulación monitoreo y equipos de alarma y equipos de protección. Este proceso de clasificación resulta interesante de cara a una futura comercialización del producto.

7.3.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA EMBARCACIÓN.

El objetivo de esta actividad era planificar y ejecutar las modificaciones necesarias en una embarcación para la integración posterior de todos los sistemas previstos en el proyecto. La idea inicial era implementar el sistema en una embarcación de la empresa Trampalones, S.L. de casco de poliéster y, en este sentido, en la anualidad 2011 se trasladó la embarcación hasta las instalaciones de la Universidad de Oviedo en el Campus de Viesques de Gijón. Paralelamente al dimensionado de equipos y la definición de su futura colocación en el barco, EMEDOS (entidad subcontratada por Astilleros la Venecia) realizó una simulación de los requerimientos de potencia para la propulsión del barco en base a su volumetría y peso. Los requerimientos de potencia

resultantes de esta simulación demostraron la imposibilidad de navegar con el sistema de propulsión eléctrico propuesto basado en baterías-pila de combustible-placas fotovoltaicas. Ante esta situación y con la finalidad de mantener los mismos objetivos del proyecto se seleccionó otra embarcación de dimensiones similares, la misma categoría, pero fabricada en otro material más ligero (aluminio) que garantizase su movilidad en el intervalo de potencias objetivo del proyecto.

En un primer momento, se pensó en la fabricación de una embarcación nueva, de forma que esta se amoldara a nuestros equipos y sistemas, pero debido al alto coste de la misma, se opto por la compra de una embarcación de pesca de bajura ya existente y adaptar esta a nuestras necesidades.

Para la integración del sistema de propulsión híbrida diesel-eléctrica, fue necesario realizar una reforma integral de la sentina de la embarcación. El astillero encargado de realizar toda la obra de reforma y restauración de la embarcación, fue “La Veneciana”, situado en la localidad de Puerto de Vega (Navia - Asturias).

Se trata de una embarcación de 6785 mm de eslora, 1950 mm de manga y 1450 mm de puntal. Tanto el casco, como todos los elementos estructurales están contruidos en aluminio naval de ALCOA 5083-H111 (figura 7.2), lo que elimina los problemas de corrosión del acero, a la vez que proporciona un menor peso a la embarcación. En comparación con la embarcación inicialmente prevista, las dimensiones de ambas son prácticamente idénticas, la categoría es la misma y la principal diferencia radica en el material. Al ser la nueva embarcación de aluminio, el peso es tres veces inferior, lo que la hace idónea para el proyecto.



Figura 7.2.- Aluminio naval ALCOA 5083-H111.

Se ha tenido que diseñar y reconstruir toda la cubierta y sentina para albergar la nueva línea de ejes, el motor eléctrico y las baterías de propulsión y servicio; así como la construcción de una estructura sobre el guardacalor, para integrar todos los sistemas eléctricos y electrónicos, teniendo en cuenta sus pesos y dimensiones para garantizar la estabilidad de la embarcación.

Una vez definidos los requerimientos de espacio para la integración del sistema propuesto en la embarcación, se realizaron las obras de adaptación de la misma. Para facilitar la ejecución de este trabajo, la embarcación se trasladó a las instalaciones de Astilleros la Venecia. A continuación se detallan los trabajos realizados en la misma:

- **Lijado y saneamiento de la embarcación:**

Se procedió al decapado por lijadora orbital de todo el casco, eliminando la pintura y la primera capa superficial de óxido de aluminio. Sometiéndolo a un tratamiento superficial del aluminio para su posterior pintado. En la obra viva se dio una imprimación de mayor espesor para soporte del posterior pintado.

- **Adaptación y ampliación de espacio en sentina para la integración de motor eléctrico.**

Se tuvo que ampliar la sentina (figura 7.3), para ampliar la línea de ejes, teniendo que reforzar con perfiles de aluminio de alta resistencia, las cuadernas modificadas.



Figura 7.3.- Ampliación de la sentina.

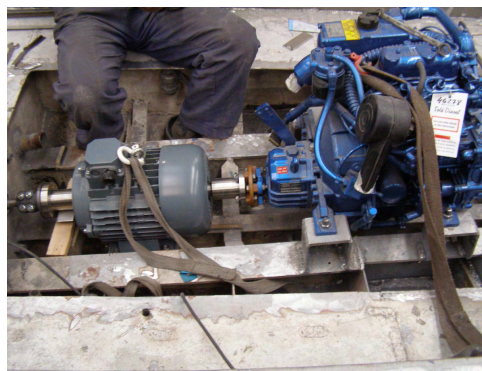


Figura 7.4.- Nuevo asiento del motor diésel y soporte para el anclaje del motor eléctrico.

El hueco de ampliación se extendió hacia proa, desplazando el asiento del motor diésel, y construyendo un soporte especial para el anclaje del motor eléctrico (figura 7.4); así como un hueco especial de forma prismática para el alojamiento de la base de la botella de hidrógeno.

- **Acoplamiento elástico entre el motor diésel y el motor eléctrico.**

Se creó una línea de eje flotante a la salida de la reductora del motor diésel, donde se encuentra el cojinete de empuje. Desde dicha salida, mediante un acoplamiento elástico de poliamida reforzada con fibra de vidrio, se ataca al eje pasante del motor eléctrico, y se finaliza la línea de ejes con un acoplamiento de doble enchavetado en el eje de cola.

Por disposición constructiva, la línea de ejes presenta un ángulo de caída hacia popa de 5°. Debido a esto, la línea de ejes: motor diésel-motor eléctrico-eje de cola, tuvo que ser alineada en planos no verticales, lo que supuso una mayor dificultad para acoplamiento de los relojes comparadores.

- **Diseño, construcción y estructura del guardacolor.**

Como toda la instrumentación eléctrica y electrónica, se posicionó lo más cerca posible de las baterías de propulsión (necesariamente en sentina para aumentar el valor del brazo adrizante GZ) y del motor eléctrico; fue necesario diseñar y construir una estructura (figura 7.5) sobre el guardacolor.



Figura 7.5.- Estructura fabricada sobre el guardacolor de la embarcación.

Dicha estructura se realizó en paneles de aluminio de propósito náutico de 3 mm de espesor, con cordón de soldadura continua de hilo de aluminio en atmósfera protectora. Se localizaron dos ventanas de observación, con cristales blindados, una para la observación del

comportamiento del grupo de propulsión híbrida: diésel-eléctrica; y otra para la visualización de la instrumentación.

La estructura cuenta con baldas para el soporte de los equipos, los cuales van trincados a la estructura para evitar su desplazamiento durante la navegación.

Así mismo, se dispuso una salida específica de evacuación del flujo de aire-vapor de agua de la pila de hidrógeno, protegida de la entrada de agua, y diseñada para auto evacuación por la corriente del viento relativo (eyección por efecto Venturi).

- **Diseño y construcción de la estructura de almacenamiento de hidrógeno**

Formando parte de la estructura sobre el guardacalor, pero totalmente independiente, se diseñó y construyó una estructura de alojamiento de la botella de hidrógeno (figura 7.6), con un amarre móvil con cincha de acero inoxidable ajustable; y una puerta vertical, sobre cuya parte superior se localizó una salida de auto evacuación en la parte superior.



Figura 7.6.- Estructura fabricada para alojar la botella de hidrógeno.

- **Diseño y construcción de la estructura soporte de los paneles solares.**

Para el soporte de los paneles solares fotovoltaicos, se dispuso una estructura tubular (diámetro 40 mm y espesor 10 mm), de aluminio de propósito náutico, de gran espesor, con soportes horizontales realizados con perfiles angulares del mismo material, donde se alojan los marcos de aluminio de las propias placas.

Esta estructura de soporte de las placas solares, se soldó al casco de la embarcación seleccionando una ubicación en la misma que protegiese de la lluvia la zona de gobierno y con

una cierta inclinación para evitar la acumulación de agua en ellas. En la figura 7.7 se muestra el montaje de la estructura de las placas solares en la embarcación.



Figura 7.7.- Construcción del soporte que aloja los paneles solares fotovoltaicos.

▪ **Pintado de la embarcación.**

Se procedió al pintado de la embarcación en 4 fases:

- Imprimación sellante y pintura especial para la obra viva.
- Pintado a pistola de toda la superficie de francobordo.
- Pintado a mano de la cubierta.
- Pintado a mano del guardacalor y de la estructura especial.



Figura 7.8.- Vista de la pintura de la obra viva y de la obra muerta de la embarcación.

Finalmente se procedió al saneamiento y lijado del entramado de madera de iroco de cubierta.

7.4.- LÍNEA DE PROPULSIÓN.

La línea de propulsión esta compuesta por el motor diesel, unido mediante un acoplamiento elástico al motor eléctrico, el eje de cola y la hélice.

- **Motor Diesel**

El motor principal empleado para la propulsión de la embarcación es un motor de dos cilindros en línea de ciclo Diesel de 4 tiempos con alimentación mediante inyección indirecta (precámara de combustión tipo Ricardo), con base Mitsubishi y marinizado por la empresa Solé Diesel S.A.

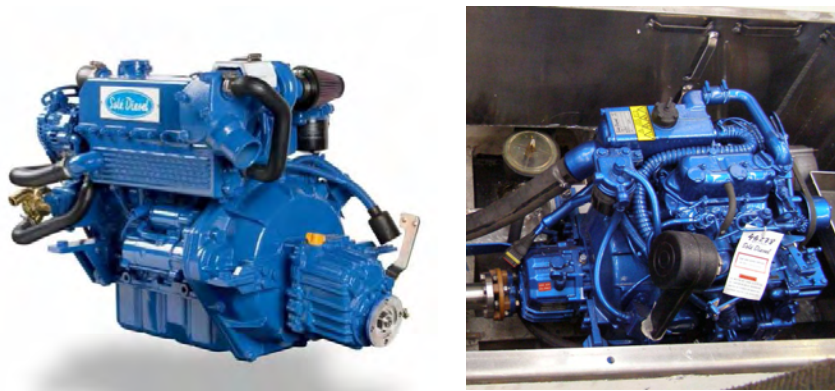


Figura 7.9.- Motor Sóle Diésel MINI-17 + TMC40.

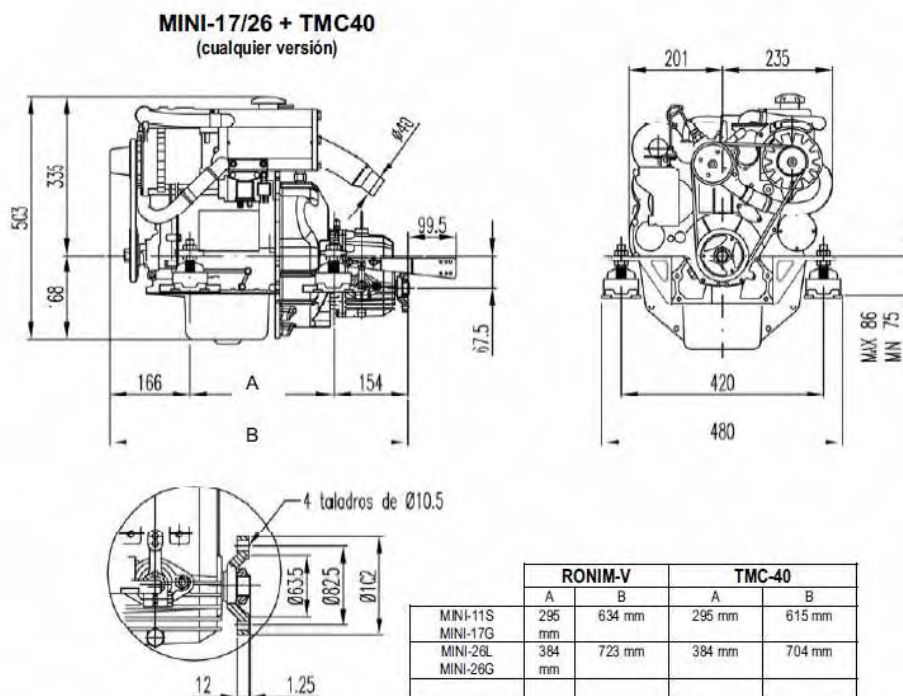


Figura 7.10.- Dimensiones del motor MINI-17 y la reductora TMC40.

Se trata del modelo Sólo Diésel MINI-17 + TMC40 (figura 7.9), el cuál incluye la reductora y el panel de mando, para la gestión del mismo. La figura 7.10, representa un croquis del motor y la reductora con sus dimensiones acotadas. En la tabla 7.1, se muestran las características Generales del motor y en la figura 7.11, se pueden ver las curvas de Par medio en el cigüeñal, potencia y consumo de combustible del motor suministradas por el fabricante.

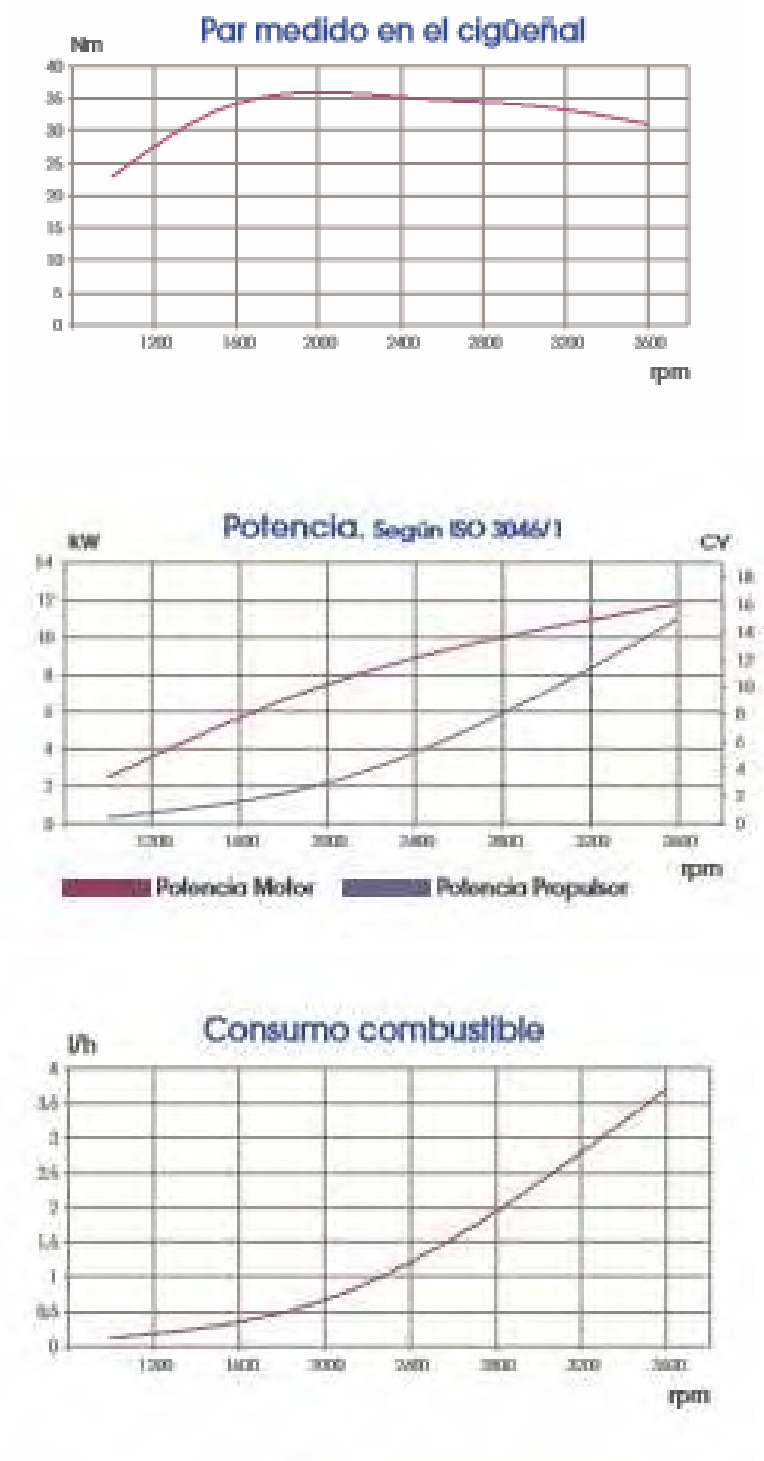


Figura 7.11.- Curvas características del motor Sólo DIESEL MINI-17.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MOTOR Sólé DIESEL MINI-17	
Base	MITSUBISHI
Tipo	Diesel, 4 tiempos
Nº de cilindros	2 en línea
Sistema de aspiración	Atmosférico
Diámetro x carrera	76 x 70 mm
Cilindrada total	635 cc
Relación de compresión	23:1
Potencia intermitente (según ISO 3046/1)	16 CV (11.8 KW)
Potencia continua	14.3 CV (10.5 KW)
RPM	3.600
Sistema de inyección	Indirecta
Motor de arranque	12V (1.2KW)
Alternador	40 A
Ángulo máximo de instalación	30 intermitente, 25 continua

Tabla 7.1.- Características generales del motor Sólé DIESEL MINI-17

El motor diesel lleva incorporado un alternador de 12 VDC y 50 W, que alimenta la batería de arranque de este. Adicionalmente, se le ha acoplado a la toma de fuerza un alternador “extra” de 24 VDC y 100 W. Ambos alternadores solamente funcionan cuando el motor diesel se encuentra en marcha, variando la intensidad de corriente generada, en función del régimen de revoluciones del motor y manteniendo ambos constante la tensión de salida gracias a un regulador.

Para la gestión y el control de los diferentes parámetros de funcionamiento del motor, así como para realizar el arranque, se ha incorporado un panel, como el que se muestra en la figura 7.12, donde se enumeran los parámetros que controla.



Figura 7.12.- Panel de control del motor Sólé DIESEL MINI-17.

Para realizar el arranque del motor, debemos asegurarnos que este se encuentra cebado de combustible y el mando de control para dar avante y atrás, esta en la posición del medio (en punto muerto).

Posteriormente, se debe poner la llave de contacto en la posición donde aparece representada una resistencia (indica el devanado de la resistencia calefactora en el interior de la bujía de incandescencia), en ese momento se encenderá la luz de precalentamiento. Esto se debe hacer así, ya que se trata de un motor diésel de inyección directa, que necesita para el arranque unas bujías de incandescencia, localizadas en la precámara de combustión, en donde se dirige el chorro de la inyección; produciéndose la combustión de una pequeña fracción del gasóleo, cuyos gases arrastran al resto de combustible a la propia cámara de combustión, en donde hay aire caliente ($\approx 450\text{K}$) y comprimido ($\approx 5\text{ MPa}$).

Transcurridos unos segundos, la luz de precalentamiento se apagara, indicándonos que podemos girar la llave a la posición “run”, momento en que actuará el motor de arranque. Una vez arrancado el motor, giraremos la llave de contacto a la posición “on” y no lo moveremos, hasta el momento en que deseemos parar el motor, en que moveremos la llave a la posición “stop”, apagándose el motor. Finalmente, cuando el motor no se este utilizando, debemos situar la llave en la posición “off” para poder extraer esta.

- **Acoplamiento elástico.**

La unión entre la reductora del motor Sóle diésel y la brida de ataque del motor eléctrico, se realizó mediante un acoplamiento elástico (figura 7.13).

Se trata de un acoplamiento de base polimérica de poliamida con fibra de vidrio (nylon 66-Dupont + GF30) con uniones roscadas de 14 mm en acero inoxidable. Su módulo de elasticidad de torsión es relativamente elevado para una poliamida (7,2 GPa), lo que permite desfases angulares relativamente pequeños. Además, permite absorciones de par del orden de 80 Nm y sobre-esfuerzos de torsión de 120 Nm.



Figura 7.13.- Acoplamiento elástico entre el motor diésel y el motor eléctrico.

- **Motor Eléctrico.**

Para la propulsión eléctrica de la embarcación, se ha empleado un motor de inducción trifásico de bajo voltaje. La robustez de su rotor de varillas de cobre sobre láminas de hierro, y el tener las bobinas en el estator, lo hacen adecuado para la instalación híbrida en serie. Los devanados del estator inducen al campo magnético a girar alrededor del rotor, provocando su giro.

La carcasa utilizada es la normalizada 132BS, sobre base Siemens y adaptada en taller para un segundo eje con acoplamiento por bridas de doble chaveta. Tiene una potencia nominal de 5,5 kW y una velocidad de giro a 50 Hz de 1430 rpm. En la figura 7.14 y 7.15, se muestra el motor eléctrico en el momento de la recepción en el astillero, su placa de características y un croquis con las dimensiones del mismo.

Durante el funcionamiento del motor eléctrico, el motor diésel esta desacoplado por la caja inversora, lo que evita que esta tenga que arrastrar al motor diesel durante su giro.

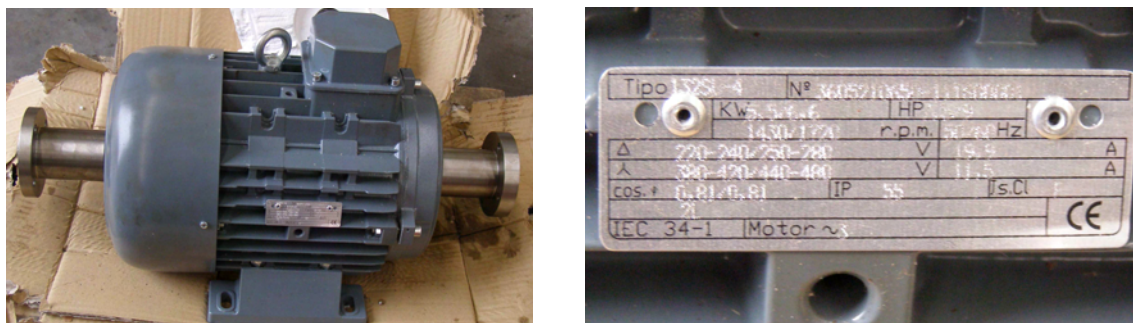


Figura 7.14.- Motor eléctrico y placa de características.

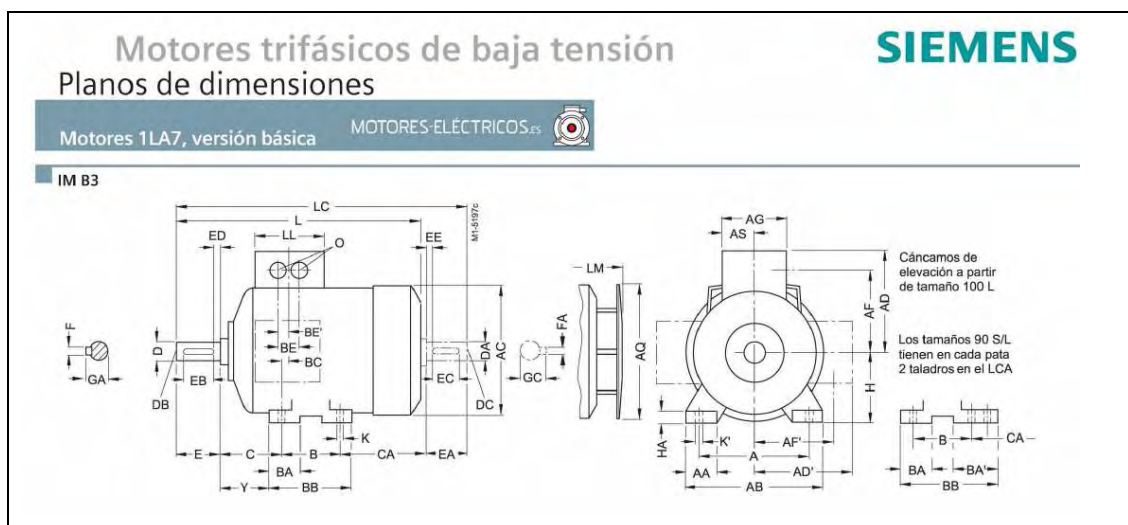


Figura 7.15.- Dimensiones del Motor eléctrico.

- **Eje de cola.**

El eje de cola tiene un diámetro de 30 mm y esta construido en acero inoxidable austenítico AISI 316, bajo en carbono y con molibdeno, para uso marino.

En la parte de proa, su unión al motor eléctrico, se realiza mediante una brida de chaveta labrada y empotrada en el acoplamiento con la brida del propio motor. En la parte

de popa, finaliza con un acoplamiento cónico enchavetado para la conexión de la hélice. En la figura 7.16 se puede ver la brida de unión entre el motor eléctrico y el eje de cola.

El eje de cola, se soporta en el prensaestopas de popa (figura 7.17), en donde se emplean elastómeros de butilo-estireno, en anillos de sección rectangular que garantizan la estanqueidad del casco en el punto donde es atravesado por el eje de cola.

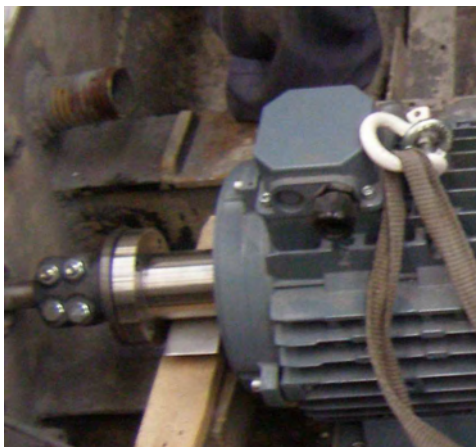


Figura 7.16.- Brida de unión entre el motor eléctrico y el eje de cola.

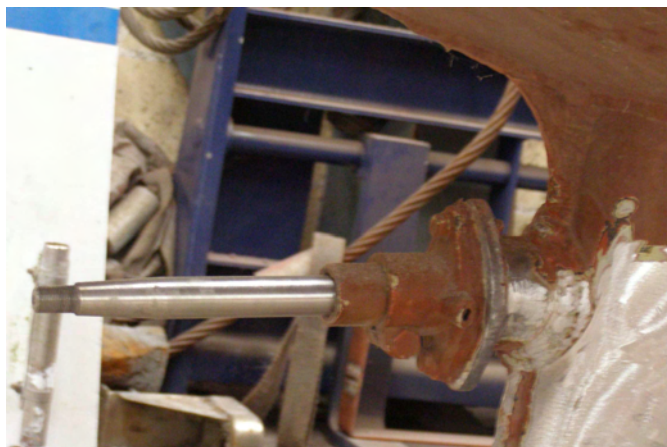


Figura 7.17.- Salida del eje de cola por el prensaestopas de popa.

- **Hélice.**

Para la propulsión del barco, se ha empleado una hélice dextrógira de 3 palas (figura 7.18 y 7.19) fabricada en bronce al manganeso. Su diámetro es de 300 mm, con una relación de paso de 0,9 y una velocidad máxima de operación sin cavitación es de 1800 rpm, lo que implica una velocidad máxima de avance sin resbalamiento de 8 m/s (Aprox. 16 nudos).



Figura 7.18.- Hélice de tres palas, antes de su tratamiento superficial en el astillero.



Figura 7.19.- Hélice en el eje de cola de la embarcación.

7.5.- GESTIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA.

La gestión de potencia, es el sistema diseñado, construido y ensayado, a propósito del presente proyecto. Está compuesto por los siguientes elementos:

- Gestor de potencia.
- Baterías de propulsión y de servicio.
- Pila de combustible.
- Placas solares.
- Alternador acoplado al motor diesel.
- Cargador-Inversor.
- Variador de frecuencia.

La función del Gestor de potencia es actuar sobre los flujos de energía entre los sistemas eléctricos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica integrados en la embarcación. El objetivo es controlar de forma centralizada en el panel de mando de la embarcación el comportamiento energético de todo el sistema.

Inicialmente, se establecieron como fuentes primarias generadoras de corriente eléctrica la pila de combustible NEXA y las placas fotovoltaicas. Adicionalmente, se decidió incorporar como fuentes de energía eléctrica un alternador acoplado al motor diesel y la posibilidad de conexión a red en pantalán.

- La pila de combustible empleada es de tecnología PEM con membrana polimérica de intercambio de protones de baja temperatura. El conjunto básico de placas es del fabricante canadiense Ballard y el diseño y construcción de planta, es del fabricante alemán Heliocentris. Con una potencia máxima de 1200 W, alimentada con hidrógeno, con su correspondiente regulador de corriente DC/DC, que obtiene una tensión de corriente continua estabilizada a 24 VDC.
- Las placas fotovoltaicas monocristalinas modelo SPM180-24, son de la casa Victron energy. Están formadas por 72 celdas en serie que generan una tensión y una intensidad máxima de 36 voltios y 5.01 amperios respectivamente. La potencia total entregada por las dos placas es de 360 W, con una tensión de corriente continua estabilizada a 24 VDC, gracias a su regulador de corriente. Sus dimensiones son 1580 x 808 x 35 mm y su peso es de 14.5 Kg/unidad.
- El alternador del Motor Diesel que se acopla a la toma de fuerza del motor con una polea elastomérica trapezoidal. Su electrónica regula una tensión de salida de carga de batería de 24 VDC, con una intensidad de 5A; lo que supone una potencia de carga de 120W.

- Toma de corriente IP67 del pantalán y un cargador-inversor de Victron Energy que combina un cargador optimizado para baterías AGM de 24 VDC y un inversor de senoide pura, con una potencia máxima de 5 kW, que permite rectificar la corriente alterna a continua y regular la carga de las baterías.

7.5.1.- Baterías.

Todos los consumos de energía eléctrica, principalmente el motor eléctrico de propulsión y los consumos auxiliares como son las luces de la embarcación, la bomba de achique, el arranque de pila NEXA, los ordenadores o cualquier otra carga, se harán a partir de grupos de baterías, para asegurar una alimentación estabilizada en tensión.

Como se ha diseñado una instalación en la línea de corriente continua de 24 VDC, se utilizan baterías ácido-plomo de 12 V en serie. Destacando que son baterías de tecnología de electrolito absorbido por capilaridad en una matriz porosa de fibra de vidrio (AGM, Absorbent Glass Matrix), de propósito específico marino; en donde el conjunto electrolito-placas de plomo, forman un conjunto sólido, pudiendo operar en cualquier posición, y no estando alterado su rendimiento por los movimientos de la embarcación.

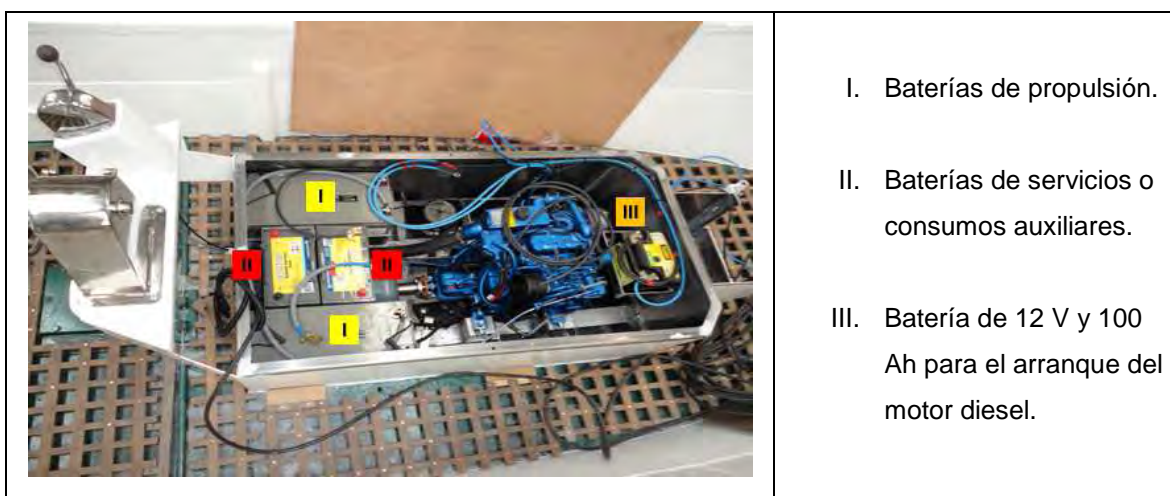
Se ha diferenciado entre baterías de propulsión, de servicio, para el arranque de la pila y para el arranque del motor diesel. Se puede ver la disposición de estas en la embarcación en la figura 7.20.

- Grupo de baterías de propulsión, compuesto por dos baterías del fabricante Victron de 12 V y capacidad de 220 Ah, conectadas en serie, lo que implica una capacidad de almacenamiento energético de 5.28 kWh. Las dimensiones de las baterías son 522 x 238 x 240 mm y el peso es de 65 Kg/ unidad. En el flujo de potencia eléctrica de propulsión, la corriente continua de las baterías (24 VDC) se pasa al inversor, que la transforma en corriente alterna sinusoidal pura (220 VAC, 50Hz, 1F), que a través de un variador de frecuencia (220 VAC, 5KW, 0-100Hz, 3F) alimenta al motor eléctrico.

- Grupo de baterías de servicios o consumos auxiliares, compuesto por dos baterías de la casa Vetus de 12 V y capacidad de 100 Ah, conectadas en serie, lo que implica una capacidad de almacenamiento energético de 2.4 kWh. Las dimensiones de las baterías son 354 x 175 x 190 mm y el peso es de 23.7 Kg/ unidad.

- Grupo de baterías de arranque de la pila de combustible NEXA de 12V y 18 Ah conectadas en serie. El sistema completo de pila de combustible NEXA, incluye el convertidor DC/DC y estas baterías de arranque.

- Una batería de 12 V y 100 Ah exclusiva para el arranque del motor diesel. Esta batería es independiente del gestor de potencia, aunque se controla desde el panel de mando su conexión a través de un interruptor.



- I. Baterías de propulsión.
- II. Baterías de servicios o consumos auxiliares.
- III. Batería de 12 V y 100 Ah para el arranque del motor diesel.

Figura 7.20.- Ubicación de las baterías en el Barco 00.

El grupo de baterías de propulsión y el de servicio se cargarán desde cualquiera de las fuentes primarias definidas previamente. Las baterías de arranque de la pila de combustible se alimentarán con corriente de salida de la propia pila. En base a esto, se definió que el gestor de potencia se encargará del control del flujo de energía eléctrica entre los sistemas definidos anteriormente y esquematizados en la figura 7.21 (nota: en la figura no se identifican los equipos necesarios para la adecuación de la corriente eléctrica a los requerimientos de cada uno, ni las baterías empleadas para el arranque de la Pila PEM y el motor diesel).

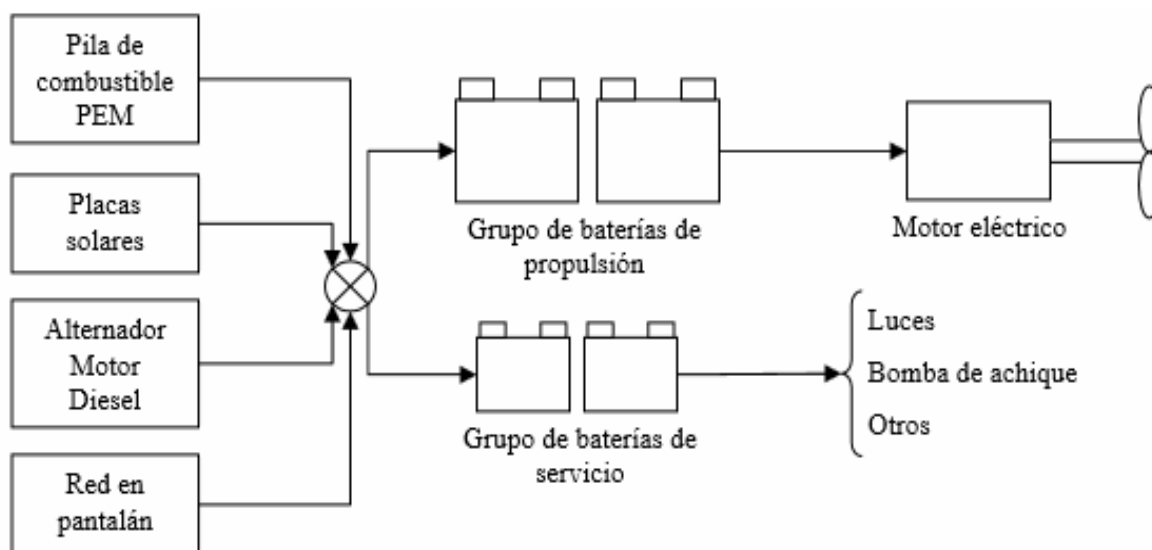


Figura 7.21.- Esquema simplificado.

7.5.2.- Instalación eléctrica integrada en la embarcación.

En base a los equipos identificados anteriormente que componen el sistema completo de propulsión eléctrica y de consumos auxiliares, se diseñó la instalación eléctrica implementada en el barco para adecuar todas las corrientes eléctricas a los requerimientos de cada equipo. En figura 7.22 se muestra el esquema simple de la instalación eléctrica que se integró en la embarcación.

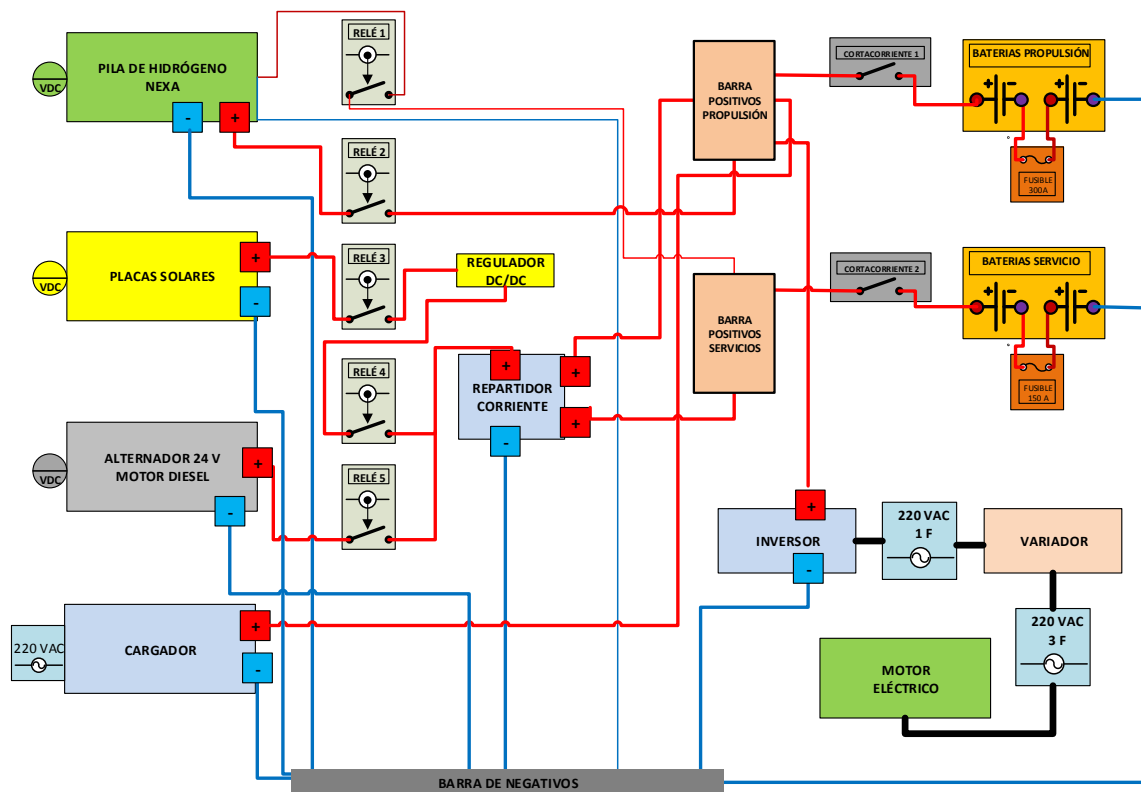


Figura 7.22.- Esquema simple de la instalación eléctrica integrada en el Barco 00.

El esquema de la instalación eléctrica completa, con todos elementos, que formen el gestor de potencia integrado en el Barco 00, aparece representado en las figuras 7.23 a 7.29.

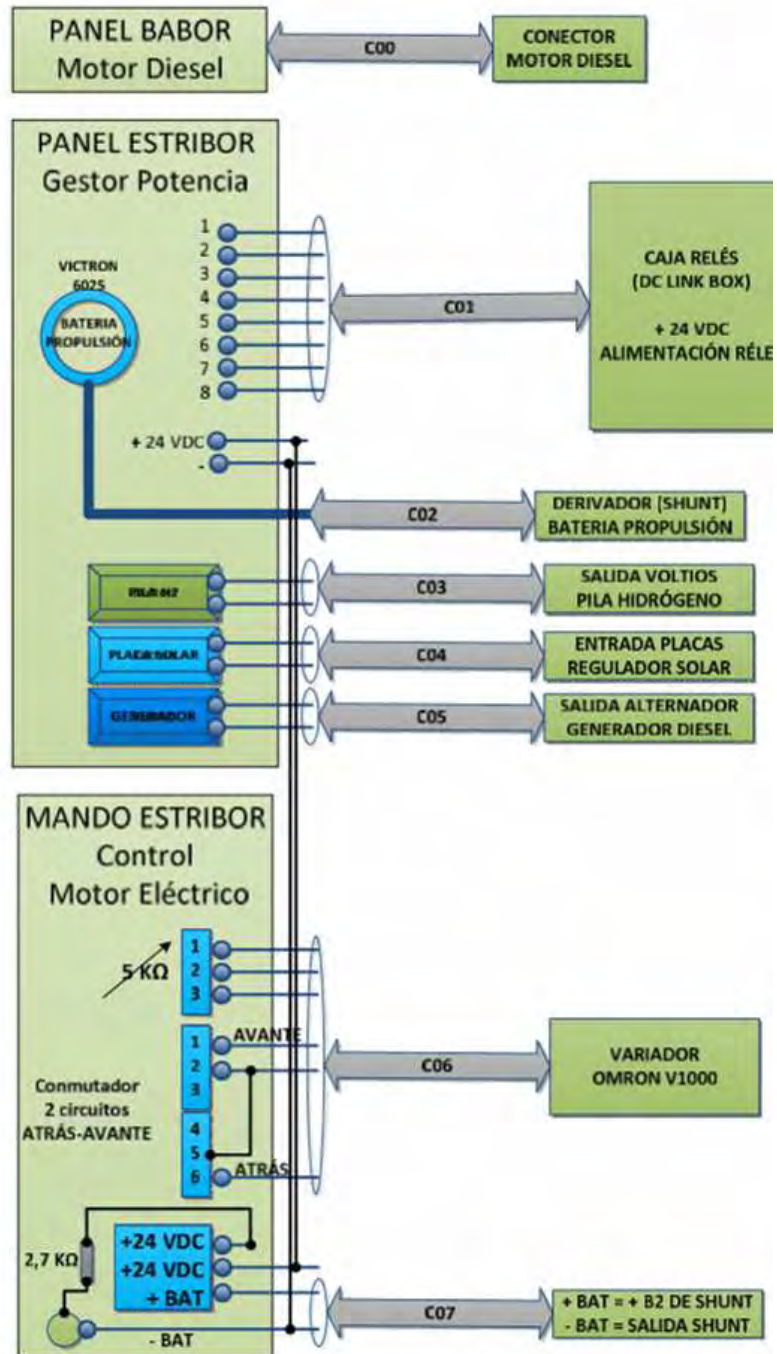


Figura 7.23.- Esquema de conexiones del panel del motor diesel, del panel del gestor de potencia y del mando para el control del motor eléctrico integrado en el Barco 00.

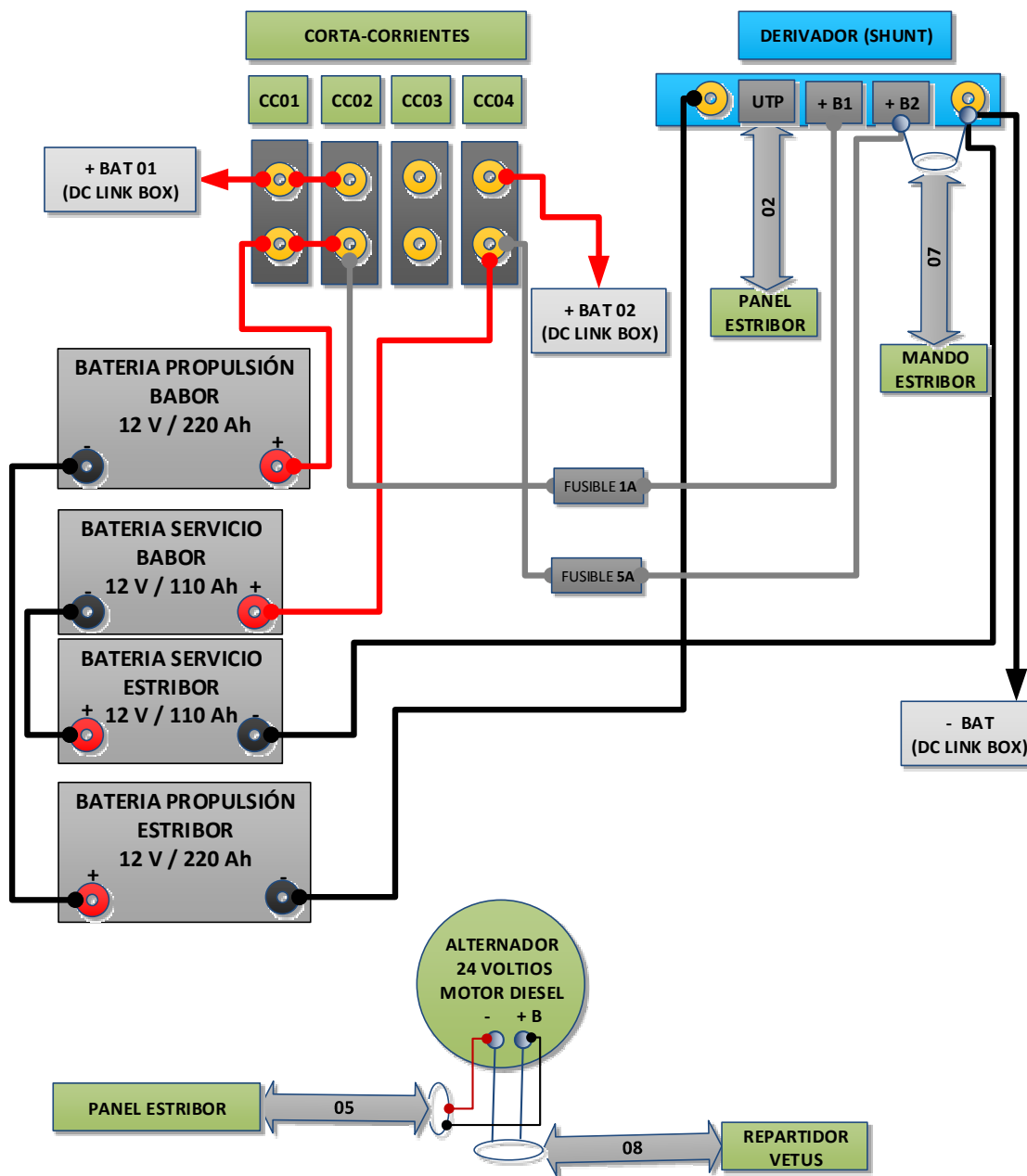


Figura 7.24.- Esquema de conexiones de las baterías, el alternador acoplado al motor diesel y los interruptores cortacorrientes.

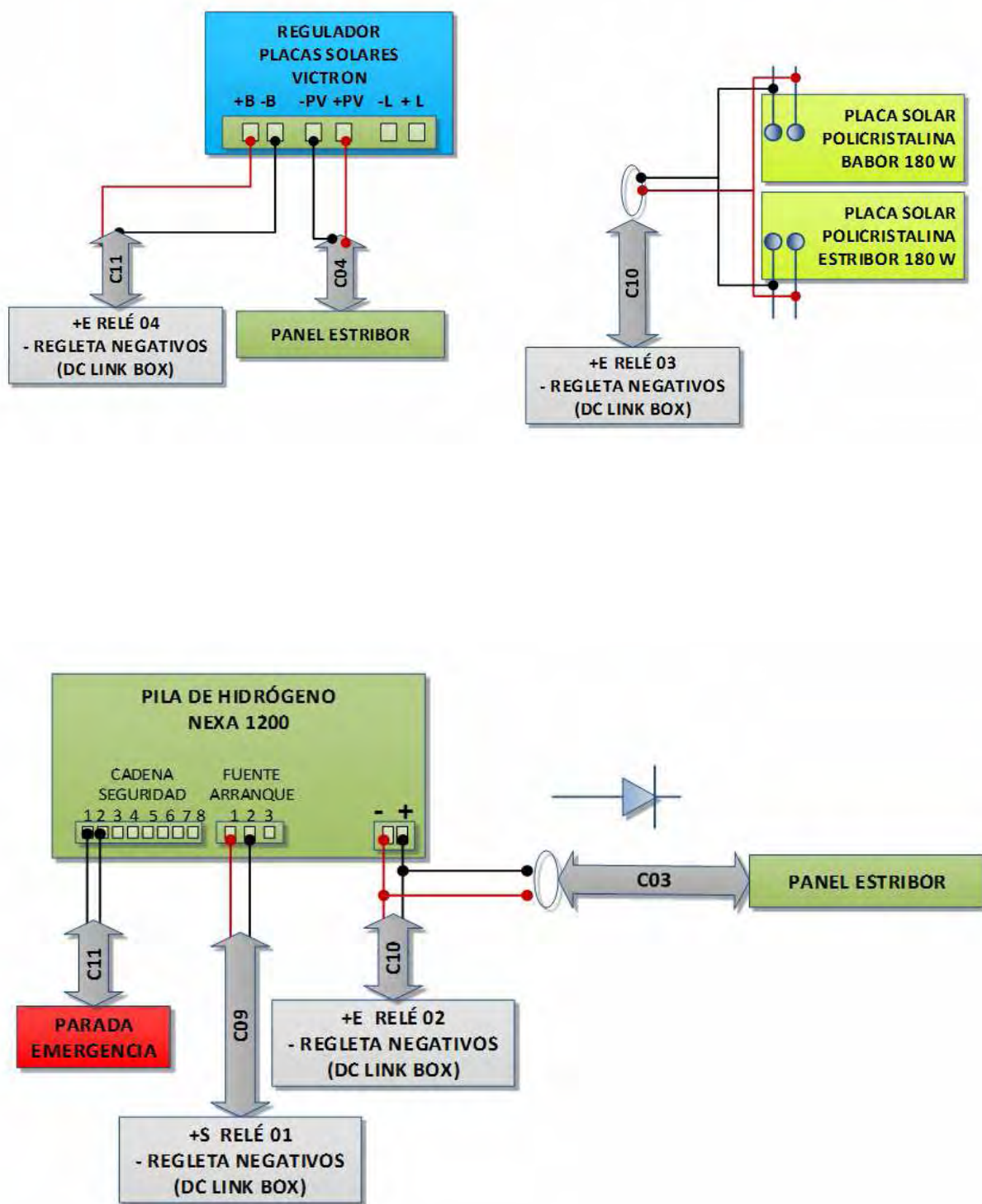


Figura 7.25.- Esquema de las conexiones eléctricas de la pila de combustible PEM NEXA 1200 y de los paneles fotovoltaicos integrados en el Barco 00.

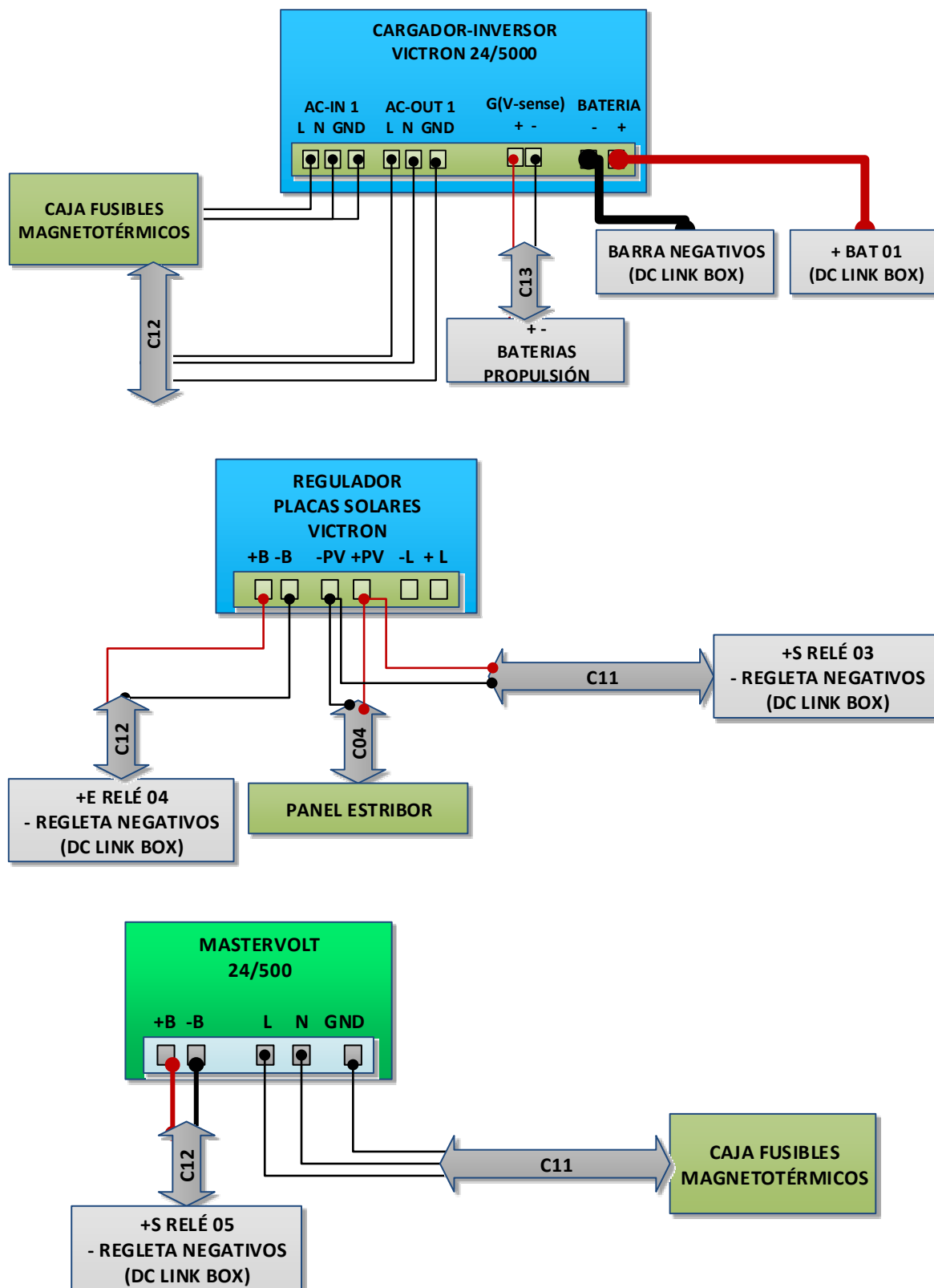


Figura 7.26.- Esquema de las conexiones eléctricas del cargador.-inversor VICTRON 24/5000, el regulador de las placas fotovoltaicas y el inversor de corriente AC MASTER 24/500 integrados en el Barco 00.

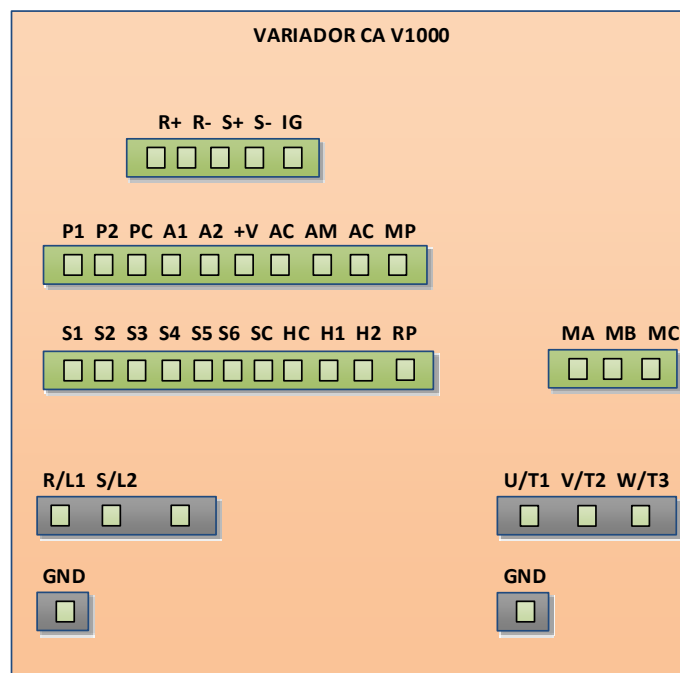
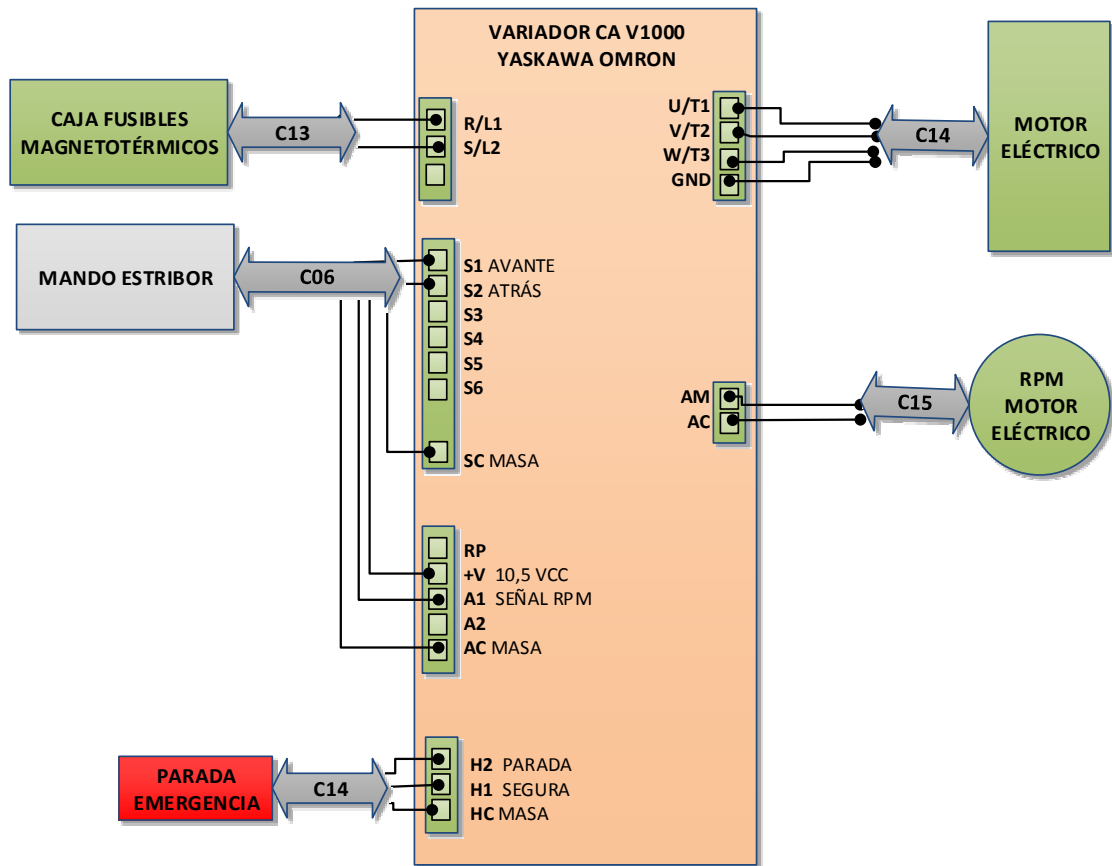


Figura 7.27.- Esquema de conexiones del variador de frecuencia YASKAWA V 1000 integrado en el Barco 00.

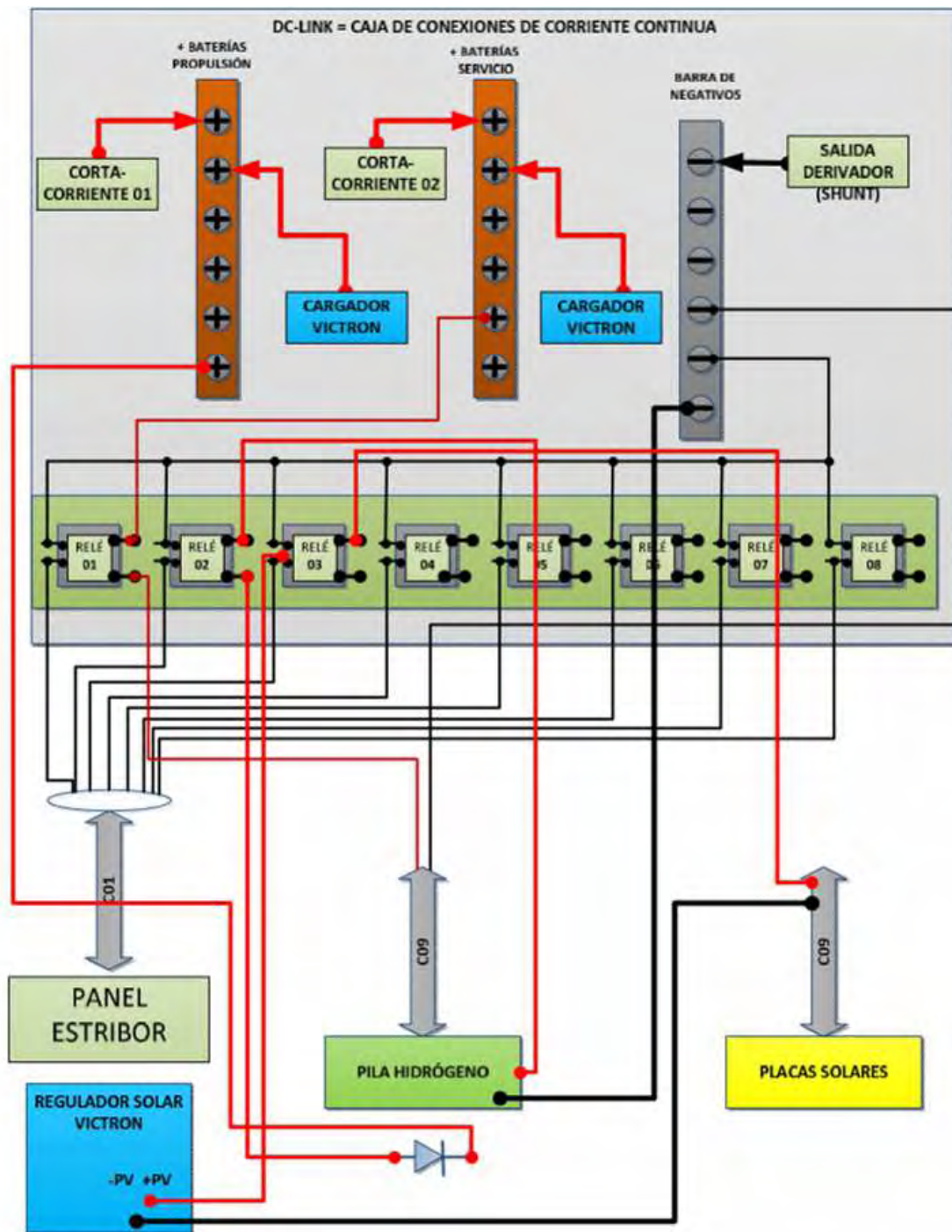


Figura 7.28.- Esquema de conexiones de la caja de enlace DC integrada en el Barco 00.

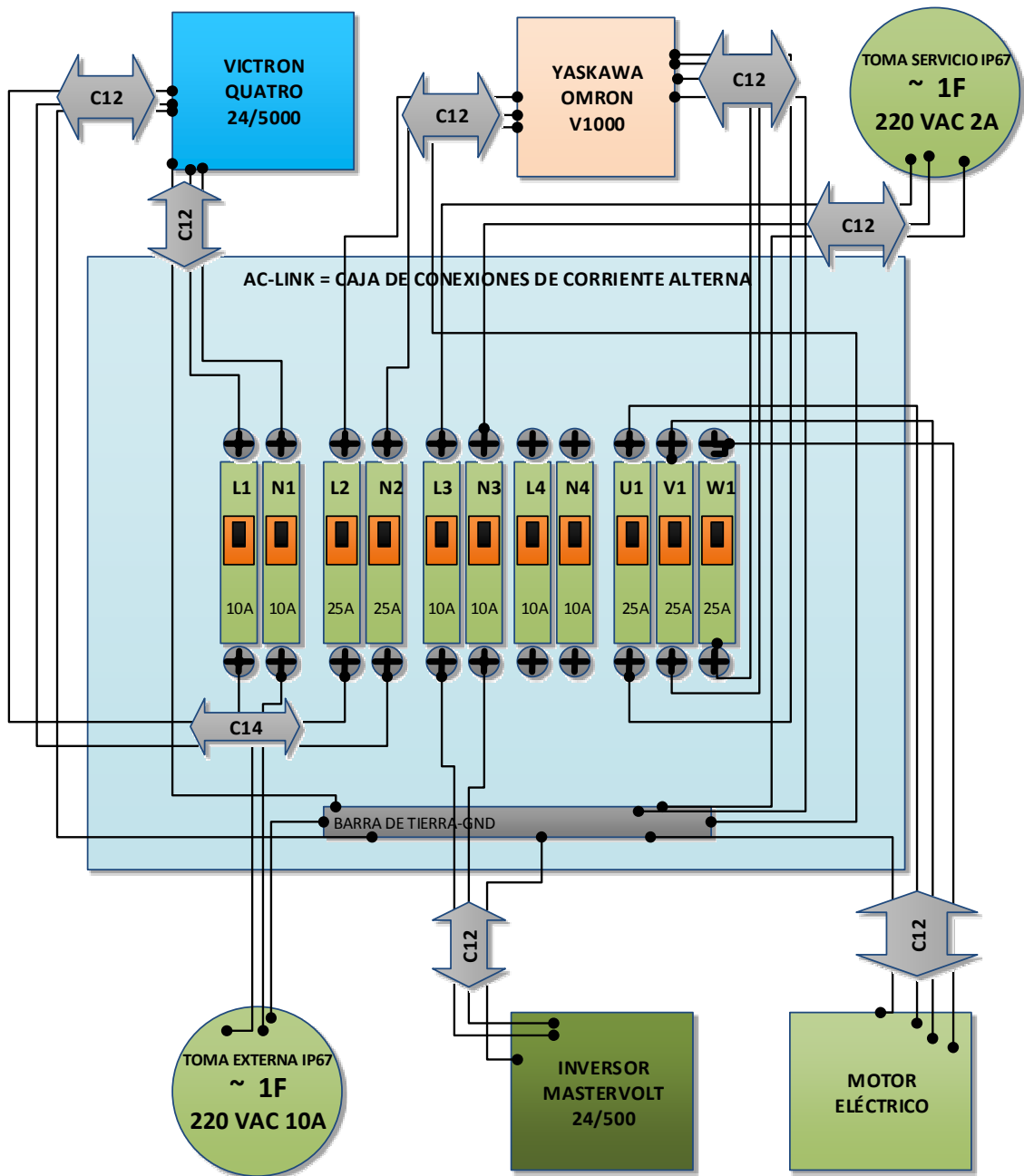


Figura 7.29.- Esquema de conexiones de la caja de fusibles magnetotérmicos integrada en el Barco 00.

Fuentes Primarias generadoras de corriente.

Las fuentes primarias generadoras de corriente eléctrica en la embarcación son la pila de combustible NEXA, las placas fotovoltaicas, el alternador del motor diesel y, cuando la embarcación está atracada en el pantalán, la posibilidad de conexión a red. Todas estas fuentes primarias cargarán el grupo de baterías de propulsión y el grupo de baterías de servicio.

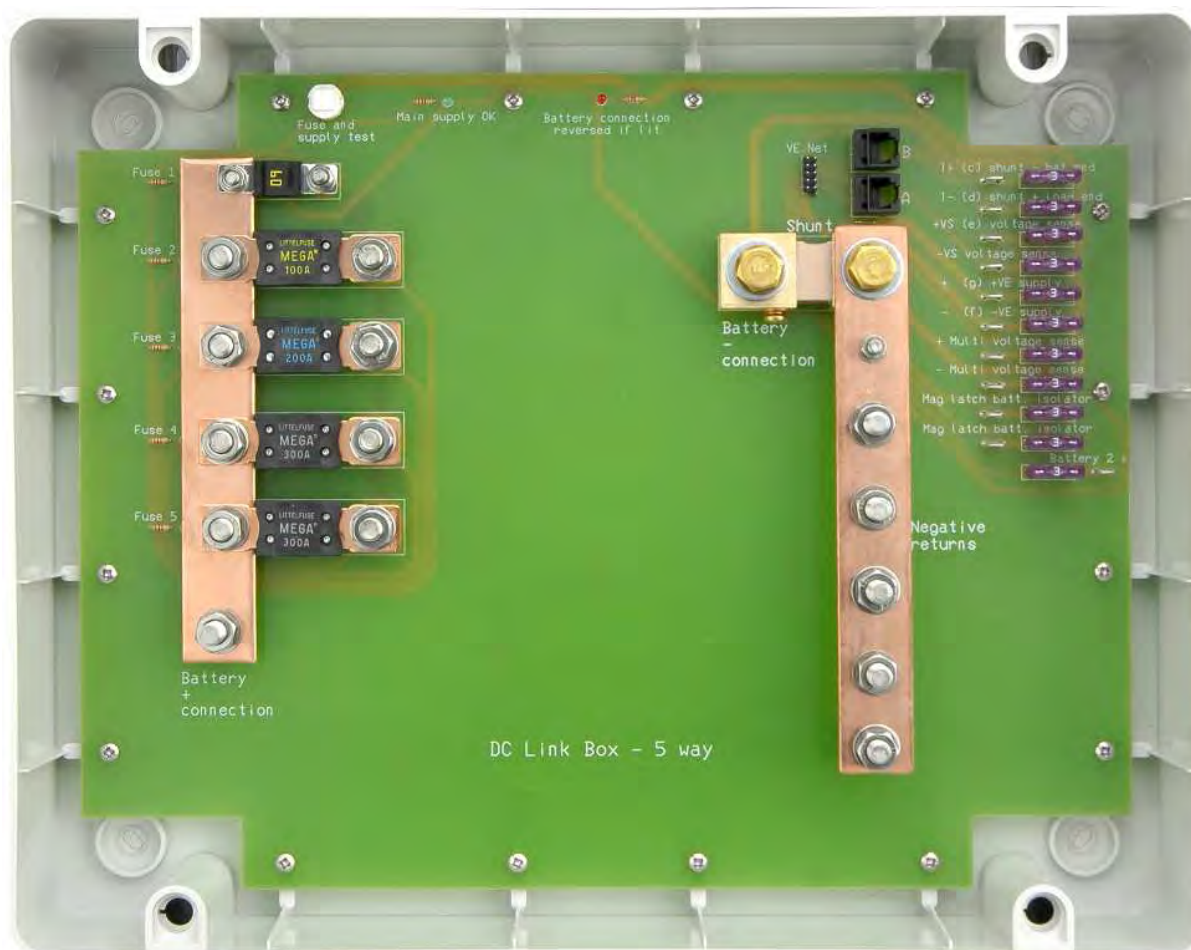


Figura 7.30.- Caja de enlace DC.

Para facilitar las conexiones y evitar que todo el cableado se conecte directamente a los bornes de las baterías, se diseñó una caja de enlace DC en la que se incluye una barra de positivos conectada a las baterías de propulsión, una barra de positivos conectada a las baterías de servicio y una barra de negativos para toda la instalación (figura 7.30). En cada una de estas barras se conectarán los positivos de cada grupo de baterías y los positivos de los sistemas correspondientes según los esquemas eléctricos diseñados. Además, se incorporaron en cada línea fusibles para proteger a los equipos. En cuanto a los negativos, todos los de la instalación se conectan a la barra de negativos para evitar diferencias de potencial entre ellos.

El equipamiento intermedio que se integrará entre cada fuente primaria y las baterías para adecuar la corriente es el siguiente:

- La pila de combustible PEM Nexa genera una corriente continua sin estabilizar, por lo que es necesario incorporar un regulador de corriente DC/DC con el que se obtiene una tensión de corriente continua estabilizada a 24 VDC. El positivo de salida del regulador se conecta directamente a la barra de positivos de las baterías de propulsión, y el negativo a la barra de negativos. Para el arranque de la pila de combustible se sirve de sus baterías de arranque.

- Las placas fotovoltaicas generan una corriente continua sin estabilizar, por lo que se incorpora un regulador de corriente DC/DC (figura 7.31) para obtener una tensión de corriente continua estabilizada a 24 VDC. El positivo de salida del regulador se conecta a un separador de baterías o repartidor de corriente (figura 7.32), cuya misión es distribuir automáticamente la corriente de carga entre los dos grupos de baterías, en función del estado de carga de cada uno.



Figura 7.31.- Regulador de corriente DC/DC de las placas fotovoltaicas.

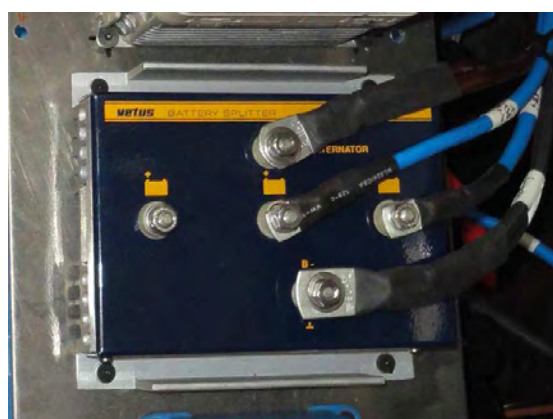


Figura 7.32.- Repartidor de corriente de las baterías.

- El alternador del Motor Diesel genera una corriente eléctrica continua con una tensión de salida estabilizada de 24 VDC. El positivo de salida del alternador se conecta al separador de baterías descrito previamente para la distribución de la corriente entre los dos grupos de baterías.

- La alimentación de electricidad de red del pantalán (corriente alterna a 220VAC) se conecta a un cargador para baterías Victron Energy (figura 7.33) con una potencia máxima de 5 kW. Este equipo permite dos salidas de corriente continua estabilizada a 24 VDC que se conectan directamente a cada una de las barras de positivos de los dos grupos de baterías.

Como ya se indicó previamente, los consumos de energía eléctrica en la embarcación se harán a partir de los dos grupos de baterías anteriores, y todas las conexiones se realizarán a las barras de positivos incorporadas en la caja de enlace DC.

El motor eléctrico requiere una alimentación de corriente alterna trifásica. Por ello, la corriente continua del grupo de baterías de propulsión pasa por un inversor de corriente Victron Energy para obtener una corriente alterna monofásica a 220 VAC y una frecuencia de 50 Hz. Posteriormente, un variador de frecuencia YASKAWA AC Drive V1000 (figura 7.34) convierte esta entrada monofásica en una salida trifásica a 220 VAC, pero de frecuencia variable en el intervalo de 0.1 a 100 Hz. Como el motor eléctrico es de dos pares de polos, su velocidad de giro es la mitad de la frecuencia de alimentación; es decir si lo alimentamos con una frecuencia de 50 Hz, su velocidad de giro será de 25 Hz, es decir 1500 rpm (un poco menos por el deslizamiento del campo magnético en la bobinas del estator). Con lo que en nuestro caso, si la frecuencia de salida del variador es la máxima de 100 Hz, podría girar a un poco menos de 3000 rpm.



Figura 7.33.- Cargador-inversor Victron Energy.



Figura 7.34.-

A la izquierda Variador de frecuencia YASKAWA V 1000.
A la derecha inversor de corriente AC MASTER 24/500.

En cuanto a los consumos auxiliares, estos se alimentan a partir del grupo de baterías de servicio. Para aquellos consumos que requieren una corriente continua, la alimentación es directa desde las baterías. Para el caso de consumos auxiliares de corriente alterna, la corriente continua de las baterías pasará por un inversor de baja potencia AC MASTER 24/500 (figura 7.34) para obtener una salida de corriente alterna monofásica a 220 VAC.

Para el control de todos los flujos de energía entre los distintos subsistemas de la instalación eléctrica se integraron varios relés a lo largo de la instalación accionados por interruptores desde el panel de mando. Los interruptores alimentan a 24 VCD las bobinas de los relés de paso de corriente continua. Los relés integrados son los siguientes:

- Relé 1: Conecta la fuente de alimentación de arranque de la pila Nexa (baterías).
- Relé 2: Conecta la salida de corriente de la pila Nexa hacia la barra de positivos de las baterías de propulsión.

- Relé 3: Conecta las placas solares a su regulador de tensión DC/DC.
- Relé 4: Conecta la salida de corriente del regulador DC/DC de las placas solares al repartidor de corriente.
- Relé 5: Conecta la salida de corriente del alternador del motor diesel al repartidor de corriente.
- Relé 6: Salida de corriente del inversor.
- Relé 7: Conecta las luces de la embarcación desde la barra de positivos de las baterías de servicio.
- Relé 8: Conecta la bomba de achique de sentina desde la barra de positivos de las baterías de servicio.

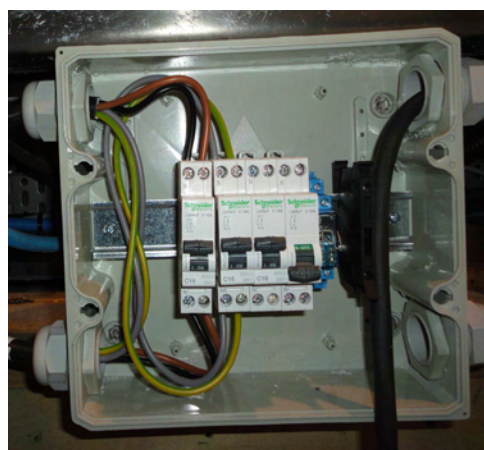
Adicionalmente, en la instalación eléctrica se instalaron tres interruptores corta-corrientes (figura 7.35) de los tres grupos de baterías; específicamente cortan los positivos de las baterías: de propulsión, de servicio y de arranque del motor diesel (esta última batería es ajena a todo el circuito, ya que es de 12V). También se instalaron varios diodos en distintas líneas para evitar retrocesos de corriente.

En el caso de las corrientes de alterna, se integraron fusibles magnetotérmicos (figura 7.36) para controlar la corriente alterna (220 VAC, 10A, 50 Hz, 1F) que entra desde el pantalán a la toma externa y pasa al cargador, y la corriente alterna (220 VAC, 30A, 50 Hz, 1F) que pasa desde el inversor al variador de frecuencia.



Figura 7.35.- Interruptores cortacorrientes de los tres grupos de baterías.

Figura 7.36.- Fusibles magnetotérmicos para el control de la corriente alterna.



Para el seguimiento de la instalación, el gestor de potencia incluye en el panel de mando (figura 7.37) un indicador de baterías que se conecta tanto a las baterías de propulsión como a las baterías de servicio, dándonos información de tensión, intensidad y porcentaje de carga para las baterías de propulsión y de tensión para las baterías de servicio. También, en el panel de mando se incorporan tres voltímetros de corriente continua que miden la tensión de salida de la pila Nexa (antes del estabilizador de corriente), la tensión de salida de las placas solares (antes del estabilizador de corriente) y la tensión de salida del alternador conectado a la toma de fuerza del motor diesel.

Para el control centralizado del gestor de potencia se diseñó el panel de mando que se implementó posteriormente en el barco. En este panel de mando, además del timón y el cuadro de control del motor diesel, se incorporó una botonera con los interruptores que controlan los relés, el indicador de baterías, los tres voltímetros y el mando que controla la velocidad de giro del motor eléctrico. El resto de interruptores y los fusibles magnetotérmicos se integraron en la estructura sobre el guardacalor en zonas accesibles para su accionamiento.



Figura 7.37.- Panel de mando del "Barco 00".

7.5.3.- Pila de combustible PEM NEXA 1200.

Paralelamente al diseño del gestor de potencia, se llevó a cabo la recepción de la pila de combustible PEM NEXA 1200 del fabricante Heliocentris (figura 7.38) y su arranque en el laboratorio. El módulo NEXA 1200 convierte el hidrógeno y oxígeno del aire en hasta 1200W de energía eléctrica en corriente continua no regulada en un intervalo de 20-36 VDC y una intensidad de corriente máxima de 60 Amperios. Sus dimensiones son 220 x 400 x 550 mm (alto x ancho x largo) y su peso aproximado es de 22 kg.



Figura 7.38.- Pila PEM Nexa 1200.



Figura 7.39.- Convertidor de corriente Nexa DC1200-24.

El módulo NEXA se alimenta con hidrógeno de una pureza del 99.95% y en un intervalo de presiones comprendido entre el 0.7 y 17 bar. El hidrógeno se suministró a partir de botellas de hidrógeno comprimido a 200 bar de calidad "Fuel Cell" (8.8 Nm³) y un sistema de regulación de presión para reducir la misma hasta los intervalos de alimentación del módulo NEXA.

En primer lugar, se llevó a cabo el montaje de la pila de combustible en su configuración más sencilla, sin conectar el convertidor de corriente DC/DC que estabiliza el voltaje de salida. De esta forma se comprobó el correcto funcionamiento del módulo. Esta configuración se esquematiza en la figura 7.40.

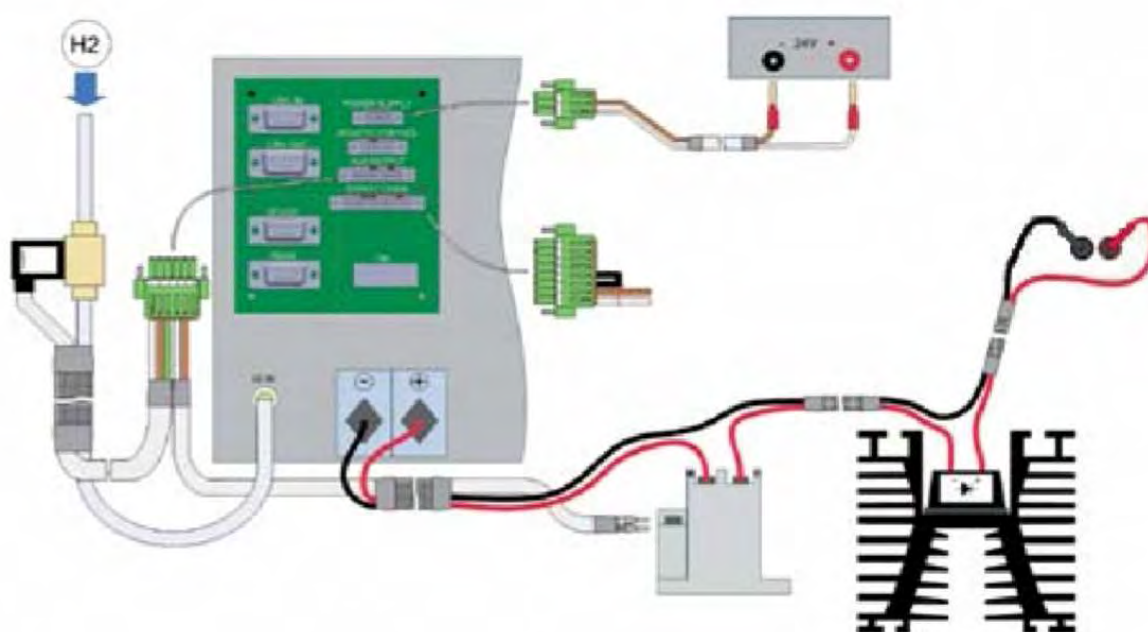


Figura 7.40.- Configuración simplificada del sistema de pila de combustible NEXA.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del módulo NEXA se acopló el convertidor de corriente Nexa DC1200-24 (Figura 7.39) de 24 V DC/DC con baterías de arranque. De esta forma, la salida de la pila de combustible suministra una corriente nominal regulada. El convertidor se configuró para una salida de 24 VDC, que es la óptima para la carga de las baterías. En la figura 7.41 se esquematiza el montaje completo.

El convertidor DC/DC controla el módulo NEXA y gestiona la carga de las baterías de arranque. El sistema alimenta los consumos externos a través del conjunto de baterías-NEXA o de las baterías sólo. Si el voltaje de las baterías decrece de un valor marcado, el módulo NEXA carga las baterías al mismo tiempo que suministra energía a la carga externa. La potencia suministrada y el tiempo de operación dependen de la capacidad de las baterías de arranque, ya que el módulo NEXA siempre da prioridad a la carga de sus baterías de arranque.

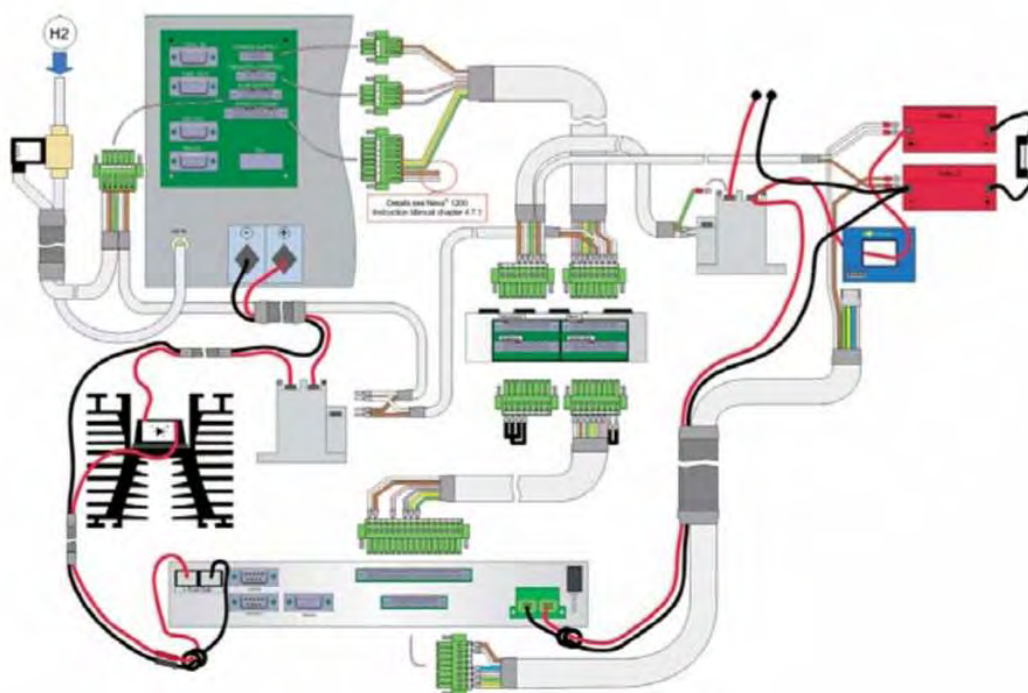


Figura 7.41.- Montaje completo de módulo NEXA con convertidor DC/DC y baterías de arranque.

El sistema completo de pila de combustible se controla con software propio (figura 7.42). La pantalla del software cuenta con 4 pestañas para monitorizar diversas variables del módulo de pila de combustible, convertidor DC/DC, baterías de arranque y resumen del sistema global.

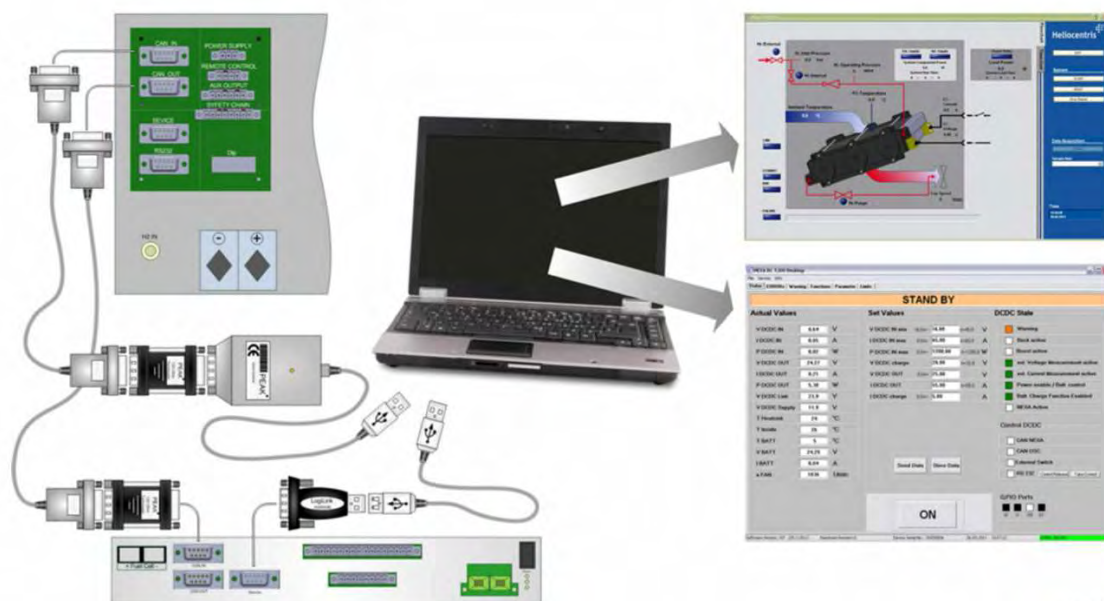


Figura 7.42.- Software de control del sistema completo de pila de combustible NEXA.

El software permite configurar el voltaje de la corriente de salida del sistema completo de pila de combustible, así como las condiciones de carga de las baterías de arranque. Lo óptimo para la carga de una batería es que si la batería está muy descargada y su voltaje es muy bajo, la corriente de carga se caracteriza por tener una intensidad elevada y un voltaje bajo, similar al de la batería. A medida que se va cargando la batería, y su voltaje aumenta, la carga se realiza a voltajes elevados e intensidades cada vez menores.

Antes del traslado e integración de todos los sistemas en la embarcación, se aprovechó para operar con la pila de combustible y familiarizarse con su funcionamiento, establecer protocolos de arranque y parada, estudiar las características y duración de las distintas fases de operación del módulo NEXA y del convertidor DC/DC, así como definir las condiciones óptimas de carga de las baterías de arranque.

▪ **Protocolo de arranque de la Pila NEXA 1200.**

1. Comprobar el nivel de hidrógeno y abrir la válvula de la botella de hidrógeno. La presión de funcionamiento debe encontrarse en torno a 2.1 Bar, sino fuera así, debemos actuar sobre el regulador. (Nota: Es importante abrir hasta el tope la válvula)
2. Dar conexión a las baterías de arranque de la pila (24 VDC), a través del interruptor situado en el panel de mando.
3. Una vez alimentada con tensión, se encenderá una luz verde situada al lado derecho del display de luces del módulo de la Pila Nexa. En ese momento, debemos pulsar el botón situado en la parte superior de la misma, al lado del display de luces.
4. En ese momento, se activa el Relé de apertura del hidrógeno, apareciendo en el display de luces de la pila, la luz más a la derecha encendida de manera permanente y la luz del centro parpadeando, ambas iluminarán con color verde.
5. En el momento en que la pila arranca, quedarán las dos luces verdes anteriormente indicadas, encendidas de modo permanente sin parpadear.

▪ **Protocolo de parada de la Pila NEXA 1200.**

1. Accionar el pulsador situado en el módulo de la pila Nexa 1200, apareciendo en el display de luces de la pila, la luz más a la derecha encendida de manera permanente y la luz del centro parpadeando, ambas iluminarán con color verde.
2. En el momento en que se apaga la luz del centro y queda únicamente encendida la luz verde de la derecha, se desconecta la conexión de la pila a las baterías de arranque de la misma, mediante el interruptor situado en el panel de mando de la embarcación.

3. Cerrar la válvula de la botella de hidrógeno.

▪ **Modo de operación de la Pila NEXA 1200.**

El módulo de la pila Nexa dispone de un display con tres luces, donde nos indica lo que esta sucediendo con la pila en cada momento. A continuación se muestra la tabla 7.2 con los distintos procesos de operación. (El “-” indica luz apagada, el “0” luz encendida y el “(0)” luz parpadeante).

LED (Visto de izquierda a derecha)			Modos de funcionamiento.
ROJA	VERDE	VERDE	
0	0	0	Inicialización (Después de aplicar una fuente de alimentación externa)
	(0)	0	Standby
-	0	0	Operando
0	-	0	Error
(0)	-	0	Error crítico en la cadena de seguridad.
-	-	-	Unidad sin fuente de alimentación externa.

Tabla 7.2.- Modo de operación de la Pila NEXA 1200.

7.5.4.- Pruebas y resultados experimentales con la Pila PEM NEXA 1200 en el laboratorio.

Durante los ensayos de conexión y arranque de la Pila NEXA 1200 en el laboratorio (figura 7.43), se produjeron una serie de incidentes que ha continuación se detallan:



Figura 7.43.- Instalación de la pila PEM NEXA y del sistema de alimentación de hidrógeno en el laboratorio, durante los ensayos realizados.

▪ **Primera Prueba:**

Esta se realizó con la conexión más simple, es decir sin el regulador de corriente Nexa DC 1200-24, ni la botonera para la activación de la pila a distancia. Tampoco se realizó la conexión de la pila al software del ordenador.

Para esta conexión se empleó la botella de hidrógeno con su regulador, un Relé que regula la apertura de la válvula de paso de hidrógeno desde la botella a la pila, la propia pila, un diodo y un segundo relé que permite dar salida a la corriente generada por la pila.

Para este arranque, la pila se alimentó con dos baterías de 12 voltios colocadas en serie (generando 24 v). La secuencia seguida para el arranque fue:

- 1- Se abrió la botella de hidrógeno.
- 2- Se comprobó la presión en el regulador.
- 3- Se alimentó la pila con las baterías.(encendiéndose la luz verde de la pila)
- 4- Se pulsó el botón de arranque de la pila.

Tras unos segundos, la pila encendió la luz roja de error y no arrancó. Se volvió a repetir la secuencia anterior varias veces sin éxito. Finalmente, tras verificar toda la instalación, descubrimos que una de las regletas posteriores de conexión de la pila tenía dos entradas para conectar un detector de fugas de hidrógeno, el cual no viene incluido con el pack de la pila. Si no se dispone de este detector, las entradas deben puentearse, ya que sino la pila lo detecta como fallo y no permite el arranque.

Una vez realizado este puente, se procedió a hacer la secuencia de arranque indicada anteriormente. En este caso la pila arrancó con normalidad y comenzó a generar corriente. Lo primero que se observó fue que transcurridos unos minutos de funcionamiento, el relé de la válvula de hidrógeno, cogía demasiada temperatura. Tras esta prueba se apagó la pila y al volver a arrancarla, esta ya no lo permitió, su luz roja parpadeaba y daba avería. Se realizaron varios intentos sin éxito, de modo que se revisó el estado de todas las conexiones, el caudal de hidrógeno, así como el puente realizado en la conexión de la pila no observando ninguna anomalía.

▪ **Segunda Prueba:**

Al día siguiente, se realizó el mismo proceso de arranque y la pila arrancó con normalidad al primer intento, de manera que decidimos conectar el software, para lo cual apagamos la pila. Una vez conectado, esta se volvió a arrancar con normalidad. Esto nos permitió visualizar las

pantallas, donde se muestran los diferentes parámetros de funcionamiento de la pila, así como la presión de suministro de hidrogeno y la temperatura exterior.

Tras realizar algunos cambios de las configuraciones de los valores de la pila en las pantallas del ordenador, apagamos la pila y ya no nos permitió volver a arrancarla en los siguientes intentos. Suponiendo que podía deberse a algún cambio realizado por nosotros con el ordenador optamos por desconectar este.

- **Tercera Prueba:**

Se vuelve a conectar la pila sin software y esta funciona correctamente, por tanto decidimos apagarla y pasar a conectarla sin software, pero con el resto de componentes, es decir con el módulo Nexa DC 1200-24 y la botonera. En este caso la secuencia de arranque varía, ya que el arranque de la pila no se realiza actuando sobre el botón que lleva incorporada la pila, sino que debe hacerse desde una botonera externa.

De nuevo la pila no arranca, realizamos varios intentos sin éxito. Esta vez, nos damos cuenta que el puente que realizamos debido a no tener el detector de fugas de hidrógeno, hay que realizarlo en otra regleta, ya que cambian muchas de las conexiones con esta nueva configuración. Hecho esto, conseguimos que la pila arranque.

- **Cuarta Prueba:**

Apagamos la pila y le conectamos una carga variable a la pila, para ver el comportamiento de la misma al aumentarle la demanda de carga. Al hacer esto la pila de nuevo no arranca. Optamos por desconectar todo y hacer el montaje sencillo, tras lo cual la pila vuelve a funcionar. Después de muchas pruebas y de montar y desmontar un sistema y otro y de hacer varias pruebas tanto con software como sin el descubrimos que el problema real de la pila es que cada vez que se apaga hay que dejarla unos minutos, antes de poder volver a realizar el arranque, sino va a dar error en todos los intentos.

Esto nos hace suponer que la pila esta diseñada para estar trabajando de manera continua, es decir arrancada todo el tiempo y cuando detecta que no se le pide suministro de corriente, se queda en modo stand-by de bajo consumo.

- **Conclusiones:**

La pila no trabaja correctamente si se anda apagando y arrancando, como si se tratase de un motor de combustión interna, sino que debe trabajar de modo continuado. En este sentido, era mejor el comportamiento de la pila PEM Nexa 1200 empleada anteriormente en el banco de

ensayos del laboratorio, la cual permitía ser apagada y arrancada sin necesidad de periodos de espera entre una operación y otra.

Como ventajas respecto a la anterior pila utilizada, presenta un menor volumen y peso, mayor solidez estructural, y puede instalarse en posición vertical, horizontal o colgada de una pared. Además no es necesario recoger el agua destilada generada durante la reacción, ya que el stack de cátodo abierto facilita el drenaje del agua acumulada durante la reacción, esta se evapora con el aire de refrigeración y se expulsa mediante el conducto de aire de la parte trasera del sistema.

El relé de la válvula de alimentación de hidrógeno se calienta sin necesidad de que la pila trabaje durante un largo periodo de tiempo, no obstante en las pruebas realizadas con la pila en el laboratorio, la temperatura se estabilizó tras unos minutos de funcionamiento.

El sistema de unión de los cables a las conexiones de las regletas de la pila es poco fiable, de manera que cada vez que la pila no arranca, genera dudas respecto a las conexiones. La solución radica en la mejora de las mismas.

Aparte de lo anteriormente mencionado, la pila durante el funcionamiento, según se le va demandando potencia, incrementa su temperatura. Para reducir esta, la propia pila tiene incorporado un ventilador que se activa automáticamente, lo cual supone que el propio sistema de la pila realice un consumo mayor que el que realiza durante su funcionamiento normal. Se puede apreciar en la tabla de caracterización de la pila (tabla 1), que la temperatura de esta, llegó a alcanzar 53.9 °C, con una temperatura ambiente de 18 °C, durante un funcionamiento aproximado de una hora y sin exigirle el máximo rendimiento. Por lo tanto, nos queda observar que ocurre con esta temperatura cuando se someta a mayor demanda con el motor de la embarcación y a temperaturas ambiente superiores.

- **Resultados experimentales:**

El software NEXA@OSC (figura 7.44) nos indica el valor de presión de entrada del hidrógeno a la pila (Bar), el valor de la presión de operación del Hidrógeno (mbar), la temperatura de funcionamiento de la pila (°C), la temperatura ambiente (°C), el caudal que genera el ventilador (litros/minuto), la intensidad de corriente (A), el voltaje (v), la potencia generada por la pila (W) y la potencia consumida por los componentes de la pila (W).

Tras realizar varios ensayos de funcionamiento con la pila PEM Nexa en el laboratorio, obtuvimos a través del software de la misma, los valores mostrados en la tabla 7.3 y 7.4. En la tabla 7.3, se muestran los valores obtenidos, realizando el arranque con la pila fría, es decir a temperatura ambiente y con solicitaciones progresivas de carga. Para generar estas cargas, se

empleo un panel con una asociación de bombillas (figura 7.45), similar al empleado en ensayos de laboratorio con la anterior pila PEM Nexa (Capítulo 6.2).

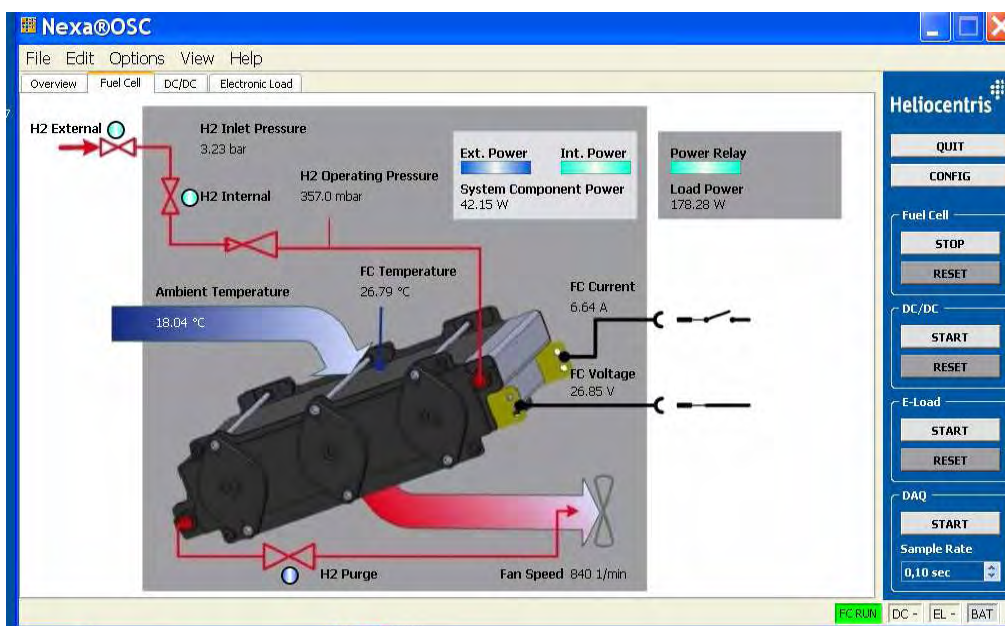


Figura 7.44.- Imagen del software NEXA@OSC de la pila Pem Nexa 1200.

En la tabla 7.3, se puede observar como al dejar durante unos minutos la pila conectada a la resistencia de 1Ω , el valor de la potencia se va incrementando. Esto ocurrió cada vez que variamos la carga, tardando unos minutos en estabilizarse, hasta dar una potencia máxima. Los valores que aparecen en la tabla para las diferentes cargas son los instantáneos, mostrándose los estabilizados únicamente para la carga de 1Ω .

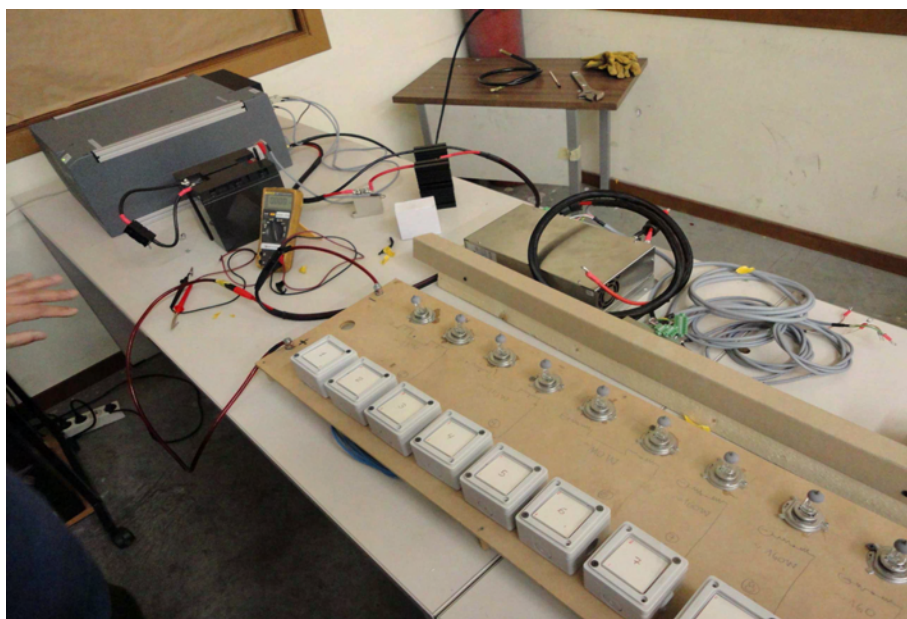


Figura 7.45.- Instalación de la pila conectada al panel de bombillas para la generación de las cargas.

En la tabla 7.4, se muestran los resultados obtenidos, partiendo de una temperatura inicial de la pila en el momento del arranque de 47.21°C. Una vez en funcionamiento, se dejó trabajando durante tres minutos, para posteriormente realizar solicitaciones progresivas de carga, hasta alcanzar un valor máximo de potencia de 949.85W. Se puede observar como en esos tres minutos en los que la pila trabajó sin estar conectada a resistencia alguna, fue disminuyendo la potencia generada, así como la temperatura de funcionamiento.

	Sin Carga	Dos Luces	Cuatro Luces	Seis Luces	Ocho Luces	Diez Luces	Tras 1 minuto	Tras 3 minutos	Tras 6 minutos
Carga (Ω)	0	5	3	2	1.5	1	1	1	1
Voltaje (V)	28.61	26.75	25.74	25.28	24.63	24.26	24.58	23.88	24.16
Intensidad (A)	1.55	5.2	8.51	11.84	16.48	21.13	21.24	25.78	25.89
Potencia I (W)	44.35	139.1	220.15	299.32	405.90	512.61	522.08	615.63	625.50
Potencia II (W)	46.06	44.94	44.5	44.49	43.58	45.12	42.28	42.2	43.49
Temp. (°C)	18.73	22.75	24.37	28	33.42	38.35	42.28	44.61	47.94

Potencia I => Potencia de salida de la pila.
Potencia II => Potencia de consumo para el sistema de la pila.

Tabla 7.3.- Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200 sometida a diferentes cargas, partiendo de una temperatura inicial de arranque de la misma igual a la ambiente.

	Sin Carga	Tras 1 minuto	Tras 3 minutos	Variación progresiva de la carga exterior.							
Voltaje (V)	31.16	30.6	29.30	26.25	25.51	24.72	24.26	23.28	23.96	22.63	22.36
Intensidad (A)	1.43	1.43	1.43	6.75	11.61	16.36	20.79	29.87	34.18	38.38	42.48
Potencia I (W)	44.42	43.76	41.9	177.19	296.17	404.71	504.37	698.36	784.77	868.54	949.85
Potencia II (W)	44.23	43.56	43.66	25.45	43.59	43.26	42.21	43.49	47.60	42.54	44.72
Temp. (°C)	47.21	40.91	25.55	42.49	28.18	30.61	34.01	42.13	45.97	50.32	53.90

Potencia I => Potencia de salida de la pila.
Potencia II => Potencia de consumo para el sistema de la pila.

Tabla 7.4.- Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200, sometida a diferentes cargas, partiendo de una temperatura inicial de arranque de la misma superior a la ambiente.

También se puede ver en los valores representados en la tabla 7.4, como la propia pila, en el momento en que se sometió al mayor requerimiento de carga, esta generó una potencia de 949.85 W y el sistema de la pila estaba consumiendo en ese instante 44.72 W, por tanto, aunque la pila nos entrega una potencia de 949.85 W, en realidad estaba generando 994.57 W.

Durante las pruebas realizadas, se observó, como al aumentar la temperatura de la pila, se incrementaba la velocidad de giro del ventilador, para disipar una mayor cantidad de calor, pasando de generar un caudal de 855 l/min, a un caudal de 2000 l/min. Esto es importante tenerlo en cuenta, ya que supone un aumento de la potencia consumida por los elementos de la propia pila de aproximadamente 70 W.

En base a los datos obtenidos en la tabla 7.4, se muestran las curvas características de Potencia-intensidad (figura 7.46) y Tensión-intensidad (figura 7.47) de la pila PEM de combustible obtenidas en las pruebas del laboratorio.

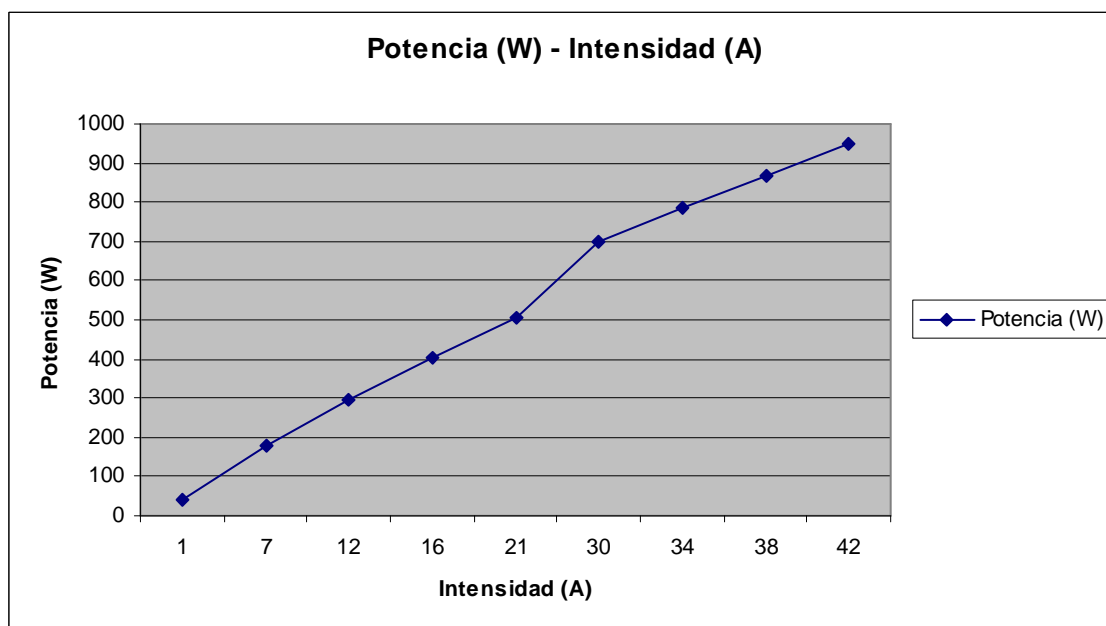


Figura 7.46.- Curva de caracterización Potencia-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200.

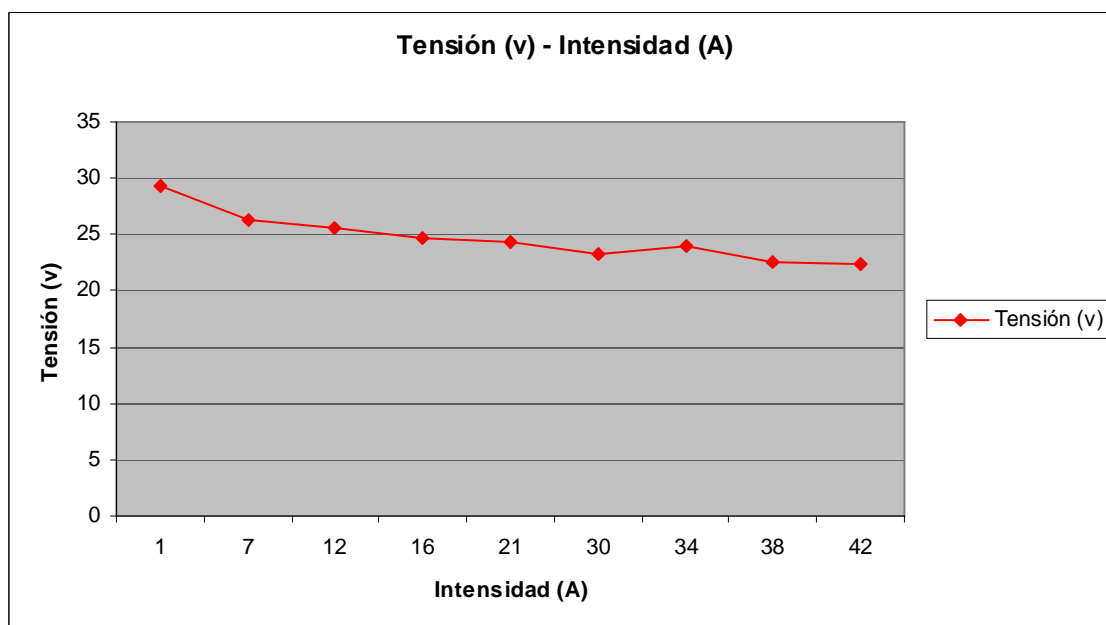


Figura 7.47.- Curva de caracterización Tensión-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200.

7.6.- INTEGRACIÓN DEL SISTEMA GLOBAL EN LA EMBARCACIÓN.

En base a los resultados de las actividades anteriores, en el marco de esta actividad se integró en la embarcación el sistema completo de generación energética, propulsión eléctrica y consumos auxiliares. En los puntos 7.3 y 7.4 de este capítulo, se describen las operaciones llevadas a cabo para la integración de la línea de propulsión, donde se incluye el motor eléctrico, el motor de gasolina, el eje de cola y la hélice. Así mismo, también se describen las operaciones llevadas a cabo para el diseño y construcción del soporte para los paneles solares fotovoltaicos, la estructura para el almacenamiento del hidrógeno y la estructura del guardacalor.

La estructura del guardacalor (figura 7.48) cuenta con baldas para el soporte de los equipos eléctricos que componen el gestor de potencia. Adicionalmente, estos se trincaron a la estructura para evitar su desplazamiento durante la navegación. Esta integración de los sistemas en la estructura se llevó a cabo fuera de la embarcación y después se transportó con una grúa al interior.



7.48.- Integración de los equipos eléctricos en la estructura del guardacalor.



7.49.- Integración de la botella de hidrógeno en la estructura de almacenamiento.

Para la alimentación de la pila de combustible en la embarcación, se integró en la estructura diseñada para la misma, una botella normalizada de hidrógeno comprimido (figura 7.49), con una capacidad de 50 L a una presión de 200 bar (a temperatura estándar de 20 °C), lo que supone una capacidad en masa de 840 gramos, que con una capacidad calorífica inferior de 120 MJ/kg, supone una energía de 100 MJ, es decir unos 28 kWh. La botella de hidrógeno va

introducida 20 centímetros bajo el plano de cubierta y se trinca con un amarre móvil con cincha de acero inoxidable ajustable. La canalización de hidrógeno, después del manoreductor de presión, atraviesa la pared de aluminio que separa la estructura de almacenamiento de hidrógeno con la estructura sobre el guardacalor y se conecta a la pila de combustible.

Una vez que se integraron todos los equipos en la embarcación, se llevó a cabo la interconexión eléctrica entre todos ellos. Teniendo en cuenta el volumen de conexiones necesarias y el poco espacio con el que se cuenta en la embarcación, el proceso resultó tedioso y exigió ir comprobando conexión por conexión con la ayuda de un multímetro de precisión que mide tensión, corriente, resistencia y posición de los diodos.

Al mismo tiempo que se iba realizando la conexión eléctrica entre todos los sistemas, éstos se conectaban también al gestor de potencia que se diseñó para la embarcación y que se integró en el panel de mando, con los elementos ya existentes de timón, palanca de mando y cuadro de control de parámetros del motor diesel.

El panel de mando del gestor de potencia incluye una botonera cuyos interruptores controlan de forma centralizada los relés que se describieron en el punto 7.5. Del mismo modo, en el panel de mando se incluye el indicador de baterías que controla el estado del grupo de baterías de propulsión y de servicio, así como los tres voltímetros que controlan el voltaje de salida de la pila de combustible PEM, las placas solares y el alternador del motor diésel. En un lateral del panel de mando se integró la palanca de mando del motor eléctrico que controla su velocidad de giro. En este panel de mando, se incluyó una pequeña palanca que actúa como conmutador y sirve para invertir el sentido de giro del motor eléctrico: con la palanca a proa, se activa la marcha “avante”, con la palanca a popa, se activa la marcha “atrás”. En el panel de mando se incluyó una tapa para proteger todos los controles.

Dentro de la estructura sobre el guardacalor se incluyeron los interruptores cortacorriente y los fusibles magnetotérmicos que se discutieron en el punto 7.5.

Para el caso del control de las variables de operación de la pila de combustible, se dejó preparada una conexión USB para conectar un ordenador portátil durante las pruebas de navegación.

Una vez que se llevó a cabo la integración de todos los sistemas y su interconexión eléctrica, se comprobó el correcto funcionamiento del sistema completo mediante su start-up y arranque en seco.

7.7.- PRUEBAS DE MAR DE LA EMBARCACIÓN.

Una vez que se finalizó la integración de todos los sistemas en la embarcación, su interconexión y su arranque en seco para comprobar el correcto funcionamiento de todos los equipos, se trasladó la embarcación desde las instalaciones del astillero al puerto de Puerto de Vega para llevar a cabo las pruebas estáticas de flotabilidad y estabilidad con la ayuda de los ingenieros navales de EMEDOS.

7.7.1.- Pruebas de estabilidad, flotabilidad y dinámicas.

Se realizaron las pruebas de flotabilidad y estabilidad de la embarcación. Entendiendo por flotabilidad, la propiedad que tienen los barcos para mantenerse a flote y que sumergidos hasta la línea de máxima carga, quede volumen suficiente fuera del agua para que pueda navegar con mal tiempo, en previsión de aumento de peso por embarque de agua. En cuanto a la estabilidad, ésta fija la naturaleza del equilibrio, evaluando la tendencia que tiene la embarcación a regresar a su posición normal de reposo cuando es separado de ella por la acción de fuerzas interiores (carga, combustible, lastre, etc.) y exteriores (viento, olas de mar) como también el grado de reserva de flotabilidad que aún queda, cuando se lo somete a una acción perturbadora externa. Los resultados de las pruebas en la embarcación adaptada fueron satisfactorios.

Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas dinámicas para comprobar el correcto funcionamiento del motor diesel, ya que se llevaron a cabo modificaciones de su configuración y posición, por tanto, era necesario confirmar su funcionamiento óptimo como elemento de seguridad. La embarcación desarrolla una velocidad de aproximadamente 6 nudos con propulsión diesel cuando el motor esta desarrollando una potencia del 30% y de unos 10 nudos, cuando la potencia generada por el motor es del 100% (Full).

En la figura 7.50 se muestran algunas de las imágenes correspondientes al transporte, puesta a flote y pruebas de navegación realizadas.

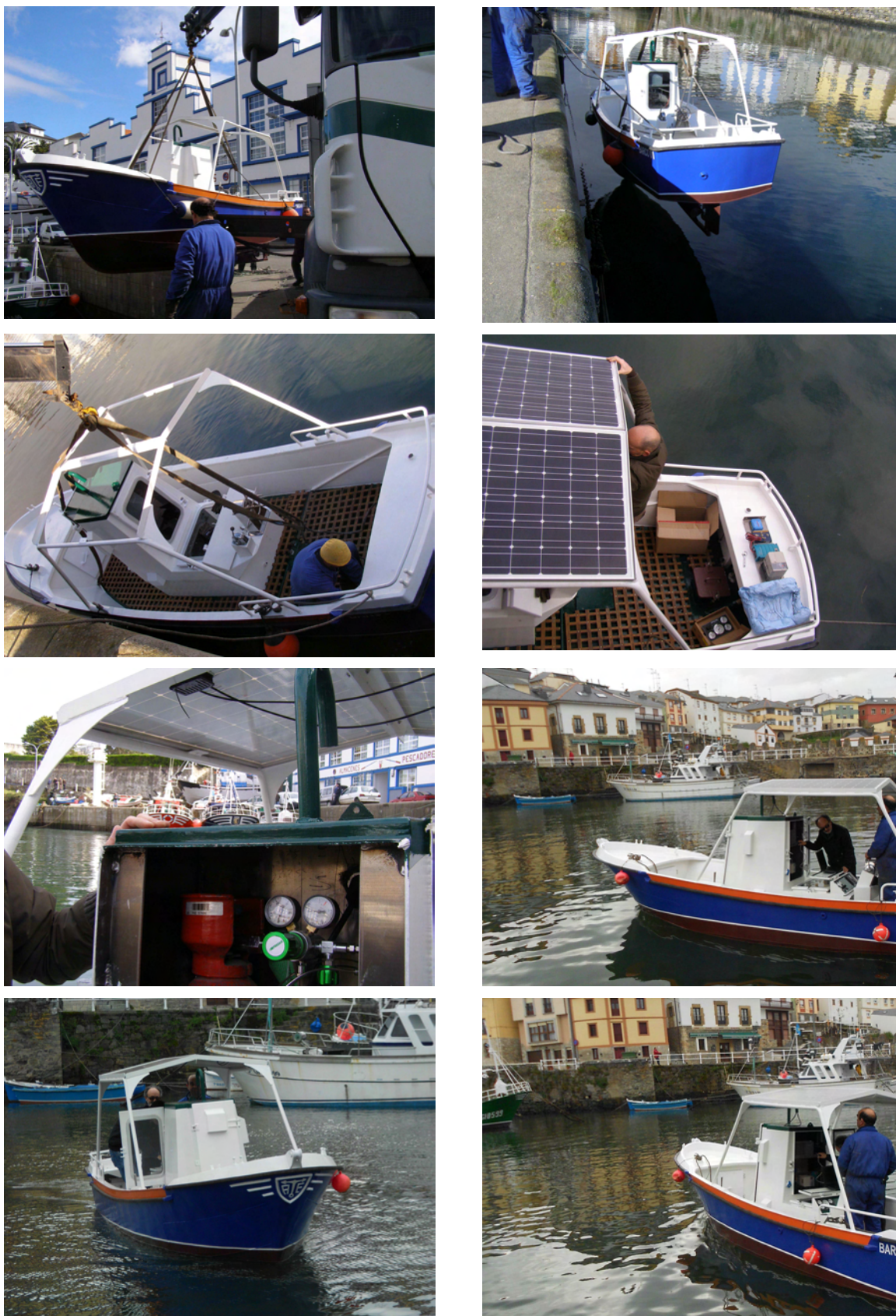


Figura 7.50.- Fotografías del transporte, puesta a flote y pruebas de navegación con la embarcación.

7.7.2.- Pruebas de navegación con el sistema completo de propulsión.

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas de navegabilidad y maniobrabilidad de la embarcación con el sistema de propulsión eléctrico, con el que la embarcación es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 3 nudos. Para ello, en primera instancia se operó con la configuración eléctrica más sencilla consistente en las baterías de propulsión-motor eléctrico. Para ello, el protocolo de operación fue:

- Activar baterías de propulsión (conectar corta-corriente 1).
- Activar fusibles magnetotérmicos.
- Activar inversor de alta potencia mediante interruptor en consola central.
- Programación del variador de frecuencia e inicio de la secuencia de funcionamiento del variador (Set-up).
- Activar llave de contacto del panel de mando del motor eléctrico.
- Girar la palanca de mando del motor eléctrico, el motor eléctrico empieza a girar avante.

Se fue comprobando la respuesta de la embarcación con la variación en la velocidad de giro del motor eléctrico y la maniobrabilidad. Paralelamente, se fue monitorizando la descarga de las baterías con el indicador de baterías del panel de mando. Una vez que se optimizó el funcionamiento del sistema simplificado baterías-motor eléctrico, se llevaron a cabo ensayos para comprobar el funcionamiento de las distintas fuentes primarias de generación energética para la carga de baterías, conectando los relés correspondientes desde el panel de mando:

- Se activó el relé 3 y 4 para cargar el grupo de baterías de propulsión con las placas solares. El proceso se monitorizó con el voltímetro correspondiente e indicador de baterías del panel de mando.
- Se activo el relé 5 para cargar el grupo de baterías de propulsión con el alternador del motor diesel. El proceso se monitorizó con el voltímetro correspondiente e indicador de baterías del panel de mando.
- Se activo el relé 1 y 2 y se llevó a cabo el protocolo de arranque del sistema de pila de combustible para cargar el grupo de baterías de propulsión. El proceso se monitorizó con el software de la pila de combustible, el voltímetro correspondiente del panel de mando y el indicador de baterías.

Aprovechando la configuración que nos permite definir el gestor de potencia. Para ello, se fue fijando la frecuencia de giro del motor eléctrico con el variador de frecuencia (en lugar de con la palanca de mando que no es tan precisa), incrementando progresivamente la velocidad de giro del motor y monitorizando la potencia de operación de la pila de combustible, así como el resto de variables (temperatura, velocidad del ventilador de la pila, intensidad y voltaje, etc.).

En base a los datos obtenidos (tabla 7.5), se muestran las curvas características de Potencia-intensidad (figura 7.51) y Tensión-intensidad (figura 7.52) de la pila PEM de combustible obtenidas durante las pruebas de mar y comparadas con las obtenidas en los ensayos realizados en el laboratorio.

	Variación progresiva de la velocidad de giro del motor eléctrico.								
Voltaje (V)	29.16	26.21	25.33	24.70	23.86	21.96	21.56	22.18	21.69
Intensidad (A)	1.43	6.75	11.61	16.36	20.79	29.87	34.18	38.38	42.48
Potencia (W)	41.7	176.9	294.1	404.1	496.2	656.0	736.9	851.2	921.6

Tabla 7.5.- Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200 conectada directamente al motor eléctrico, durante el incremento de velocidad del mismo.

Tras el estudio de las curvas de caracterización, vemos que los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio con el software de la pila, no difieren en gran medida con los obtenidos durante las pruebas de navegación. Para valores de intensidad inferiores a 16 amperios, los resultados se superponen en ambas curvas, disminuyendo a partir de esa intensidad de manera muy leve, la potencia y la tensión generada por la pila en las pruebas de mar respecto a la curva de laboratorio, con una diferencia máxima entre valores del 6.5%.

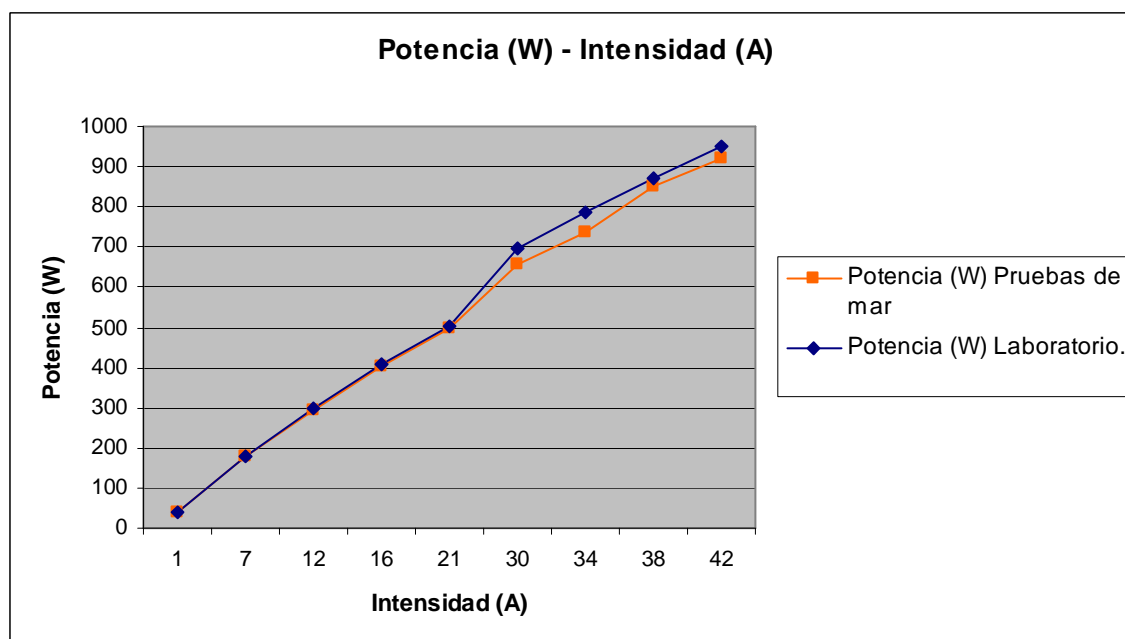


Figura 7.51.- Curvas de caracterización Potencia-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200 obtenida en el laboratorio y en las pruebas de mar.

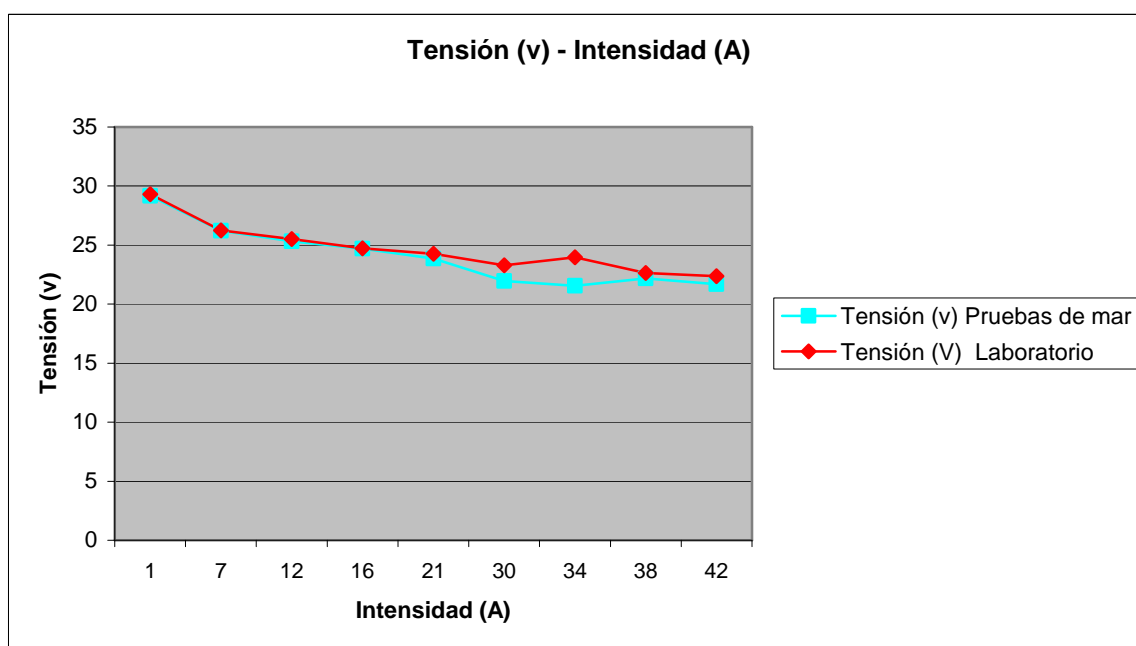


Figura 7.52.- Curva de caracterización Tensión-Intensidad de la pila PEM NEXA 1200 obtenida en el laboratorio y en las pruebas de mar.

7.7.3.- Cálculo del consumo de hidrógeno de la embarcación.

Para el cálculo del consumo de la embarcación, se llevó a cabo un procedimiento semejante al realizado para la caracterización de la pila de combustible, determinando el consumo de hidrógeno en función de la potencia de salida de la pila de combustible. El software de esta pila PEM NEXA 1200 montada en la embarcación, a diferencia de la empleada en los primeros ensayos en el banco de Pruebas del laboratorio, no nos muestra el consumo en el software. En la tabla 7.6 se representan los valores de consumo de hidrógeno teóricos proporcionados por el fabricante, expresados en slpm (Standard liters per minute) en función de la potencia de salida de la pila.

Intensidad (A)	0	5	10	15	20	25	30	33	35
Potencia (W)	0	180	350	500	650	780	920	980	1020
Consumo de H₂ (slpm)	0	2.0	3.8	5.7	7.5	9.4	11.3	12.5	13.3

Tabla 7.6.- Curva de consumo de hidrógeno teórica.

La figura 7.53, se representa el consumo de hidrógeno teórico proporcionado por el fabricante, frente a la potencia.

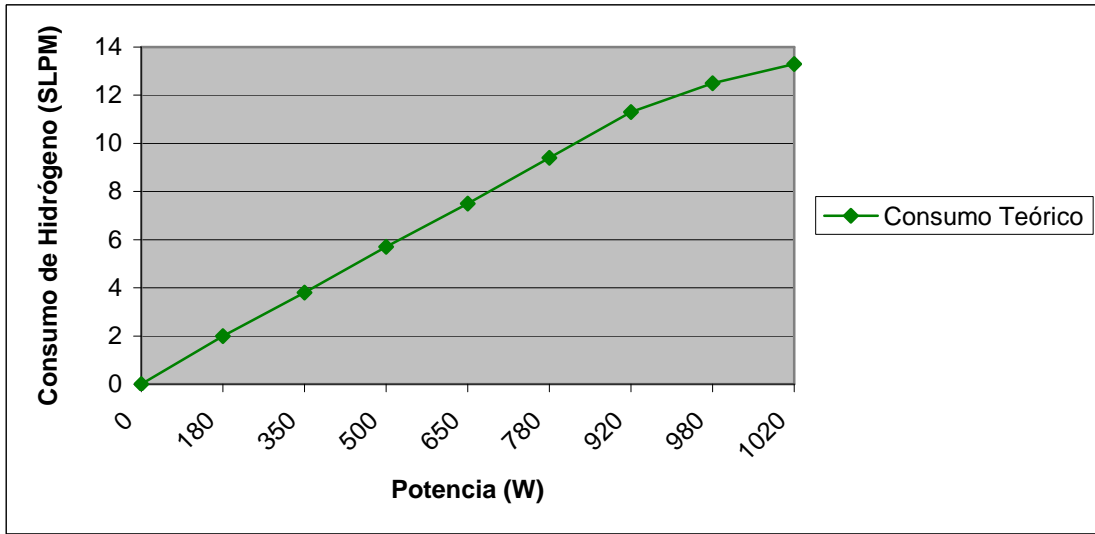


Figura 7.53.- Consumo de H₂ teórico de la pila de combustible, frente a potencia de la pila.

Durante las pruebas de mar, al ir incrementando la velocidad de giro del motor eléctrico para la propulsión de la embarcación, aumento la potencia generada por la pila. A partir de estos valores experimentales de potencia (tabla 7.7) obtenidos en el software de la pila, se creo la curva de consumos experimental durante la navegación (figura 7.54).

	Variación progresiva de la velocidad de giro del motor eléctrico.								
Consumo de H₂ (slpm)	0.46	1.96	3.21	4.48	5.65	7.59	8.77	10.37	11.33
Intensidad (A)	1.43	6.75	11.61	16.36	20.79	29.87	34.18	38.38	42.48
Potencia (W)	41.7	176.9	294.1	404.1	496.2	656.0	736.9	851.2	921.6

Tabla 7.7.- Valores obtenidos con la Pila de combustible PEM NEXA 1200 conectada directamente al motor eléctrico, durante el incremento de velocidad del mismo.

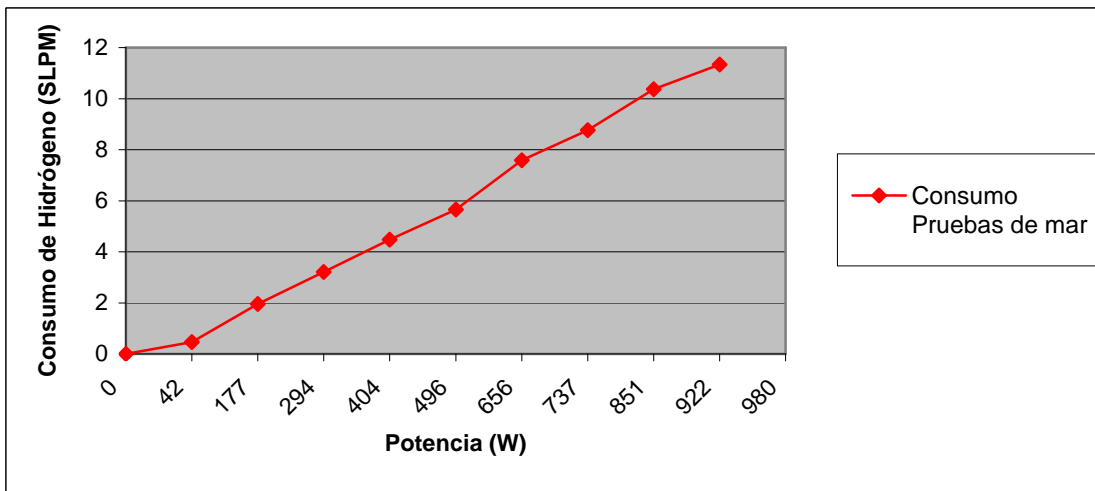


Figura 7.54.- Consumo de H₂ de la pila de combustible, durante las pruebas de mar realizadas con la embarcación.

El suministro de combustible de hidrógeno para la embarcación, se realizó mediante el empleo de una botella de hidrógeno, suministrada por la empresa PRAXAIR. Las botellas de hidrógeno, son fácilmente identificables por el código de colores. El cuerpo de la botella, ha de ser de color rojo, como en cualquier gas que sea inflamable (gas cuyo límite de inflamabilidad inferior en aire sea $\leq 13\%$, o tenga un campo de inflamabilidad $> 12\%$) o combustible. La ojiva y la franja que separa el cuerpo de la botella de la ojiva, también lucen el mismo color, por tanto, la botella es de color rojo en su totalidad.

El hidrógeno se encuentra en fase gaseosa comprimido a alta presión, en concreto, cada botella contiene 50 litros de hidrógeno a 200 Bar, con un peso total de 86 kg. Para calcular la autonomía disponible, partiremos de:

$$P \cdot V = \text{cte.}$$
$$P_{\text{H}_2 \text{ Botella}} \cdot V_{\text{H}_2 \text{ Botella}} = Z \cdot P_{\text{atm}} \cdot V_{\text{(SL)}}$$

Siendo " $V_{\text{(SL)}}$ " el volumen expresado en litros estándar (condiciones normales de presión y temperatura) y " z " el factor de compresibilidad (es la razón del volumen molar de un gas con relación al volumen molar de un gas ideal a la misma temperatura y presión), cuyo valor para el hidrógeno cuando este se encuentra a una presión de 200 bar es de 1.132. Sustituyendo valores, obtenemos el volumen de hidrógeno a presión atmosférica, siendo este:

$$200 \text{ bar} \cdot 50 \text{ litros} = 1.132 \cdot 1.013 \text{ bar} \cdot V$$

$$V = 8720.55 \text{ SL}$$

A continuación en la tabla 7.8, se muestran el consumo de hidrógeno y la autonomía disponible, en función de la potencia generada por la pila PEM, durante la navegación. Como se puede observar, el consumo cuando navegamos a máxima potencia, en torno a 950 W, sufre un incremento del 72 % respecto al consumo a 600W, con lo que la autonomía se reduce a casi la mitad de tiempo. No obstante, para que la embarcación sea capaz de desarrollar una velocidad próxima a los 2 nudos, deberemos estar generando una potencia por encima de los 800 W, lo cual nos da una autonomía aproximada de 15 horas.

No debemos olvidar que además de la propulsión con hidrógeno, también disponemos del motor diesel, lo que hace que la autonomía total de la embarcación aumente de manera considerable. La embarcación cuenta con un tanque de almacenamiento de gasoil de 30.24 litros, lo nos da una autonomía de navegación aproximada de 15 horas y 7 minutos, con el motor girando a 2800 rpm, ya que a este régimen de giro el motor consumirá 2 l/h según datos del fabricante (ver curva de consumo en la figura 7.11 del punto 7.4).

AUTONOMÍA DE LA BOTELLA DE HIDRÓGENO.								
Potencia (W)	600	650	700	750	800	850	900	950
Consumo (SLPM)	6.91	7.52	8.23	8.95	9.65	10.35	11.03	11.90
Autonomía (horas/ minutos)	21 / 03'	19 / 20'	17 / 40'	16 / 14'	15 / 04'	14 / 02'	13 / 10'	12 / 13'

Tabla 7.8.- Tabla de consumos y autonomía, en función de la potencia generada por la pila PEM.

Para poder cuantificar el coste energético, mediante el empleo de la pila de combustible PEM NEXA 1200 y el motor de combustión interna diesel tradicional, lo primero que vamos a calcular son los kg de combustible que contiene la botella de hidrógeno, mediante la aplicación de la ecuación de los gases perfectos.

$$P \cdot V = z \cdot n \cdot R \cdot T$$

Donde:

P = La presión expresada en atmósferas.

V = Volumen expresado en litros.

z = Factor de compresibilidad.

n = número de moles.

T = Temperatura expresada en grados Kelvin.

R = 0.082 at·litro / °K· mol

Sustituyendo valores obtenemos:

$$200 \text{ Bar} \cdot (1 \text{ atm} / 1.013 \text{ Bar}) \cdot 50 \text{ l} = 1.132 \cdot n \cdot (0.082 \text{ at} \cdot \text{l} / \text{°K} \cdot \text{mol}) \cdot 273 \text{ °K}$$

$$n = 362.96 \text{ moles} \cdot (2.016 \text{ gr de H}_2 / 1 \text{ mol de H}_2) = 731.73 \text{ gr de H}_2$$

Por tanto, la botella de hidrógeno empleada como depósito de combustible de H₂ en la embarcación, contiene 731.73 gr de H₂. Y dado que el poder calorífico inferior del H₂ es de 119.93 MJ/kg, nuestra botella nos proporcionará una energía de 87.79 MJ. Si tenemos en cuenta, que el rendimiento de la pila de combustible, esta en torno al 50%, de esa energía en realidad estaremos aprovechando la mitad, en concreto 43.89 MJ.

Si realizamos los mismos cálculos para el motor diesel, en el que el poder calorífico inferior es del orden de 42.5 MJ/kg y su rendimiento se encuentra entre el 35% y el 45% en el mejor de los casos, si tomamos como rendimiento un valor intermedio del 40%, este motor estará aprovechando una energía de 17 MJ/kg. Como la densidad del gasoil es de 832 kg/m³, la energía del motor aprovechada por litro de combustible es de 14.144 MJ/l.

Si tenemos en cuenta que el coste de la botella de hidrógeno esta entorno a los 40 euros y el litro de diesel próximo a 1.35 euros, observamos que para obtener 1 MJ de energía, con el

motor diesel nos supone 0.095 euros y con la pila de combustible 0.91 euros, esto supone una relación aproximada de 1:10, por tanto, con el coste actual del hidrógeno, el uso de esta tecnología no es rentable, desde un punto de vista meramente económico.

Capítulo 8: Conclusiones y Trabajos Futuros.

8.1.- CONCLUSIONES.

En lo referente a la **normativa existente para la integración de tecnologías de hidrógeno** en el sector marítimo, se concluyó que no existe legislación específica para esta aplicación, aunque sí existen distintos estándares, generales a las tecnologías de hidrógeno, que se han desarrollado a nivel internacional para garantizar la seguridad en las distintas aplicaciones. En el caso concreto del sector marítimo y ante una posible futura comercialización de embarcaciones que integrasen pilas de combustible, se considera interesante la certificación de la embarcación por una sociedad de clasificación como Germanischer Lloyd, con experiencia en este ámbito, y que garantizaría la seguridad de esta aplicación y fomentaría la adopción por parte de los consumidores de esta tecnología como alternativa a los motores diesel convencionales. Para obtener esta certificación, sería necesario que la sociedad de clasificación estuviese implicada en todas las fases del diseño, construcción y pruebas de la embarcación.

El principal objetivo planteado al principio de esta tesis se ha alcanzado, con la **implementación en una embarcación** de un sistema innovador y sostenible de propulsión y generación energética auxiliar basado en tecnologías de hidrógeno y fotovoltaicas; así como su validación en condiciones reales de navegación.

Las **modificaciones** realizadas en la embarcación para adaptarla a los espacios y requerimientos exigidos por los sistemas de generación energética a bordo, propulsión y consumos auxiliares, que se diseñaron e integraron posteriormente, han sido totalmente satisfactorias. Como mejora, se plantea realizar una serie de reformas en la base del guardacalor, mediante la realización de dos nuevas compuertas, una en la zona de estribor y otra en la zona de proa, tras el espacio destinado a la botella de hidrógeno, que nos facilitarían el acceso a la batería de arranque del motor diesel y a las labores de mantenimiento del mismo, sin necesidad de tener que retirar el guardacalor.

En cuanto al sistema de **gestión de potencia** que controla de forma centralizada en el panel de mando, los flujos de energía entre los sistemas eléctricos de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica integrados en la embarcación, se concluye que su funcionamiento y velocidad de respuesta ha sido el esperado. No obstante, presenta el inconveniente del acceso a ciertas partes del mismo, en caso de detectar algún fallo durante la navegación con la propulsión eléctrica. En concreto, la caja de enlace DC donde confluyen todos los positivos de las baterías de propulsión y servicio, y los negativos de toda la instalación debe recolocarse y mejorarse su acceso.

En cuanto al funcionamiento de la **pila de combustible**, ésta se caracteriza por ser un sistema autónomo, de funcionamiento silencioso, carente de emisiones contaminantes y con un rendimiento muy superior al obtenido con la propulsión con el motor diesel. Su tiempo de respuesta es instantáneo a los cambios en la demanda de potencia, generando un máximo de 1 kW, un poco por debajo de los 1.2 KW que anuncia el fabricante.

No obstante, también presenta algunos inconvenientes en su operación, derivados del estado de la tecnología y las experiencias escasas de funcionamiento en aplicaciones reales. En primer lugar, el funcionamiento de la pila, no es totalmente silencioso cuando se trabaja a la máxima potencia, al incrementar su temperatura y entrar en funcionamiento de modo continuo el ventilador. Por otro lado, la pila necesita funcionar de manera continuada, en caso contrario, cada vez que se pare la pila y se desee reanudar de nuevo, se deberá dejar pasar un cierto periodo de tiempo hasta poder arrancarla de nuevo.

Como era previsible desde un punto de vista económico, la inversión inicial y el precio del hidrógeno resulta ser muy superior al del diesel. Además, la recarga de la botella de hidrógeno (transporte y colocación en la embarcación) también resulta complicada en comparación con la recarga del depósito diesel. El emplear una botella comercial de hidrógeno para la alimentación de la pila de combustible PEM, nos plantea un problema adicional de autonomía, debido a que habrá momentos en que salgamos a navegar con la botella mediada, ya que nosotros no tenemos capacidad para rellenarla, sino únicamente cambiarla por una nueva botella totalmente llena. Esto implica salir a navegar con una menor autonomía o desechar botellas que no se han consumido totalmente, lo cual encarece aún más el funcionamiento con este sistema.

Las **pruebas** de estabilidad, flotabilidad y dinámicas de la embarcación, fueron totalmente satisfactorias, a pesar de las adaptaciones realizadas en la línea de ejes del motor eléctrico, para adaptar el espacio en sentina, lo que supuso desplazar el motor diesel, así como localizar espacios en la embarcación para colocar y trincar de forma segura todos los sistemas eléctricos necesarios. Todo esto generó una variación del centro de masas de la embarcación que tuvo que ser corregido.

Por lo tanto, se puede **concluir** que se han cumplido ampliamente los objetivos del proyecto demostrando que el sistema de propulsión y generación energética implementado, basado en tecnologías de hidrógeno, es viable técnicamente trabajando a las mismas potencias, pero que además mejorará las condiciones de navegación en cuanto a reducción de emisiones contaminantes, ruido y vibraciones.

No obstante, las tecnologías de hidrógeno todavía tienen que continuar evolucionando para igualar en prestaciones a los sistemas de propulsión convencionales, ya que se han detectado importantes puntos de mejora en la tecnología.

8.2.- TRABAJOS FUTUROS.

Actualmente, se está trabajando en la optimización de la integración del equipo gestor de potencia en la embarcación. Para esto, se ha practicado una apertura en la parte de estribor del guardacalor (figura 8.1), de manera que nos permita un cómodo y rápido acceso, a la caja de enlace DC (figura 8.2) donde confluyen todos los positivos de las baterías de propulsión y servicio, y los negativos de toda la instalación.



Figura 8.1.- Orificio practicado en el guardacalor para mejorar el acceso a la caja de enlace DC.



Figura 8.2.- Nueva disposición de la caja de enlace DC en el guardacalor.

Además de esto, la conexión de las baterías se va a realizar de manera que tanto el grupo de baterías empleadas para propulsión, como empleadas para servicios, van a poder funcionar como baterías de propulsión, permitiéndonos de este modo aumentar la autonomía con navegación eléctrica. Recordemos que el grupo de baterías de propulsión estaba compuesto por dos baterías Victron de 12 v conectadas en serie, con una capacidad de 220 Ah, capaces de generar 17.28 MJ y el grupo de baterías de servicios estaba compuesto por dos baterías Vetus de 12 v conectadas también en serie, con una capacidad de 100 Ah, capaces de suministrar 8.64 MJ. Al asociarlas en paralelo, conseguimos una potencia total de salida de 25.92 MJ, que es algo más de la mitad de la energía que es capaz de proporcionar la pila de combustible (43.89 MJ).

A continuación, se muestra el como quedan las conexiones y el nuevo esquema eléctrico a implantar en el "Barco OO". En la figura 8.3 se puede ver como quedan las nuevas conexiones de las baterías, así como del Gestor de Potencia y del mando de control del motor eléctrico.

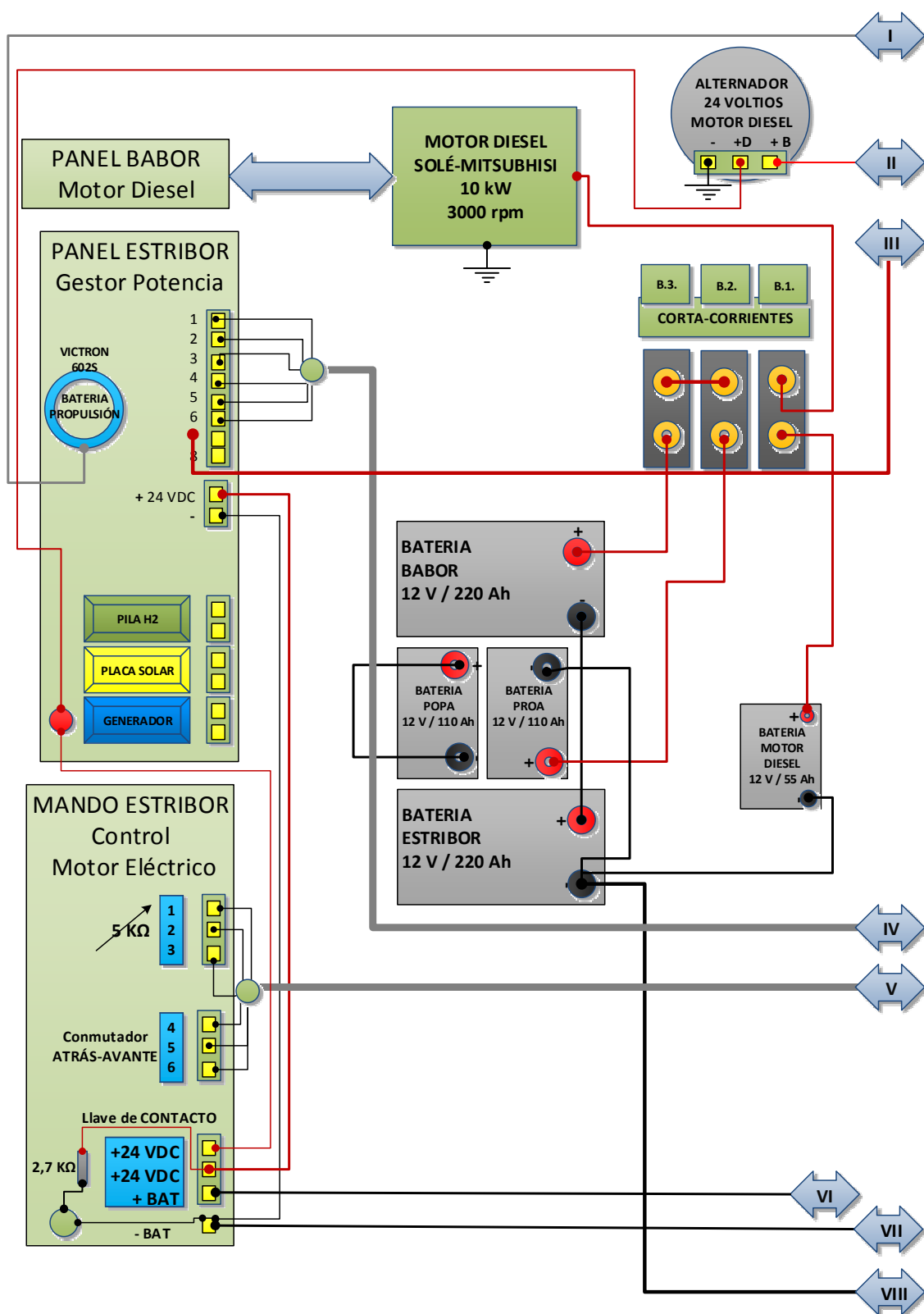


Figura 8.3.- Nueva disposición de las conexiones de las baterías, del Gestor de Potencia y del mando de control del motor eléctrico.

También se va a reubicar la caja de fusibles magnetotérmicos, que controlan la corriente alterna, pasando de la sentina al frente del guardacalor, donde su acceso es más cómodo, además de permanecer visibles durante la navegación. En la figura 8.4 se muestra la nueva disposición con sus conexiones.

Los fusibles magnetotérmicos AC1, AC2 y AC3 se emplearan para la protección con corriente aleterna y los DC1 y DC2 para la protección con corriente continua (figura 8.4). Cada uno de los fusibles magnetotérmicos cumple la siguiente función:

- El fusible AC1 nos sirve de unión entre la corriente de entrada del pantalón y el cargador inversor “Victrón 24/5000”.
- El fusible AC2 conecta la entrada de corriente del inversor “Victrón 24/5000” con el variador de frecuencia “Yaskawa Omron CA V1000”.
- El fusible AC3 conecta la entrada de corriente del inversor “Victrón 24/5000” con la toma de corriente auxiliar a 220 VAC 10A.
- El fusible DC1 conecta la entrada del positivo de las baterías con la barra de positivos de la caja DC-Link.
- El fusible DC2 conecta la entrada del positivo de las baterías con el positivo a 24VDC de la llave de contacto situada en el mando de estribor.

En la figura 8.4, se puede observar, un fusibe magnetotermico que se encuentra sin conexiones. La previsión es que sea de 16 A y empearlo como seguridad para la alimentación de la bomba de achique de sentina.

En lo que respecta a la caja de conexiones DC- Link (figura 8.5), en esta tambien se van a relaizar modificaciones que afectan a la función de los relés. Siendo estas:

- Rele 1: Conecta la alimentación para el arranque de la pila.
- Rele 2: Conecta la tensión de la pila a la barra de positivos.
- Rele 3: Conecta las placas solares a su regulador.
- Rele 4: Conecta el regulador solar a la barra de positivos.
- Rele 5: Conecta el regulador del alternador del motor diesel a la barra de positivos.
- Rele 6: Se deja instalado en previsión de futuras necesidades.

Otro de los cambios en la instalación de la embarcación, va a radicar en la anulación del inversor de corriente AC MASTER 24/500, empleado para generar una corriente alterna monofásica a 220VAC, a partir de la corriente DC almacenada en las baterías de servicio, para los consumos auxiliares. Su función, va a pasar a desempeñarla el cargador–inversor Victron

24/5000, simplificándose el sistema y reduciendo el volumen ocupado por el mismo. En la figura 8.6, se muestran las conexiones del cargador inversor, así como del sistema de producción de energía solar, de la pila de combustible PEM y del variador de corriente.

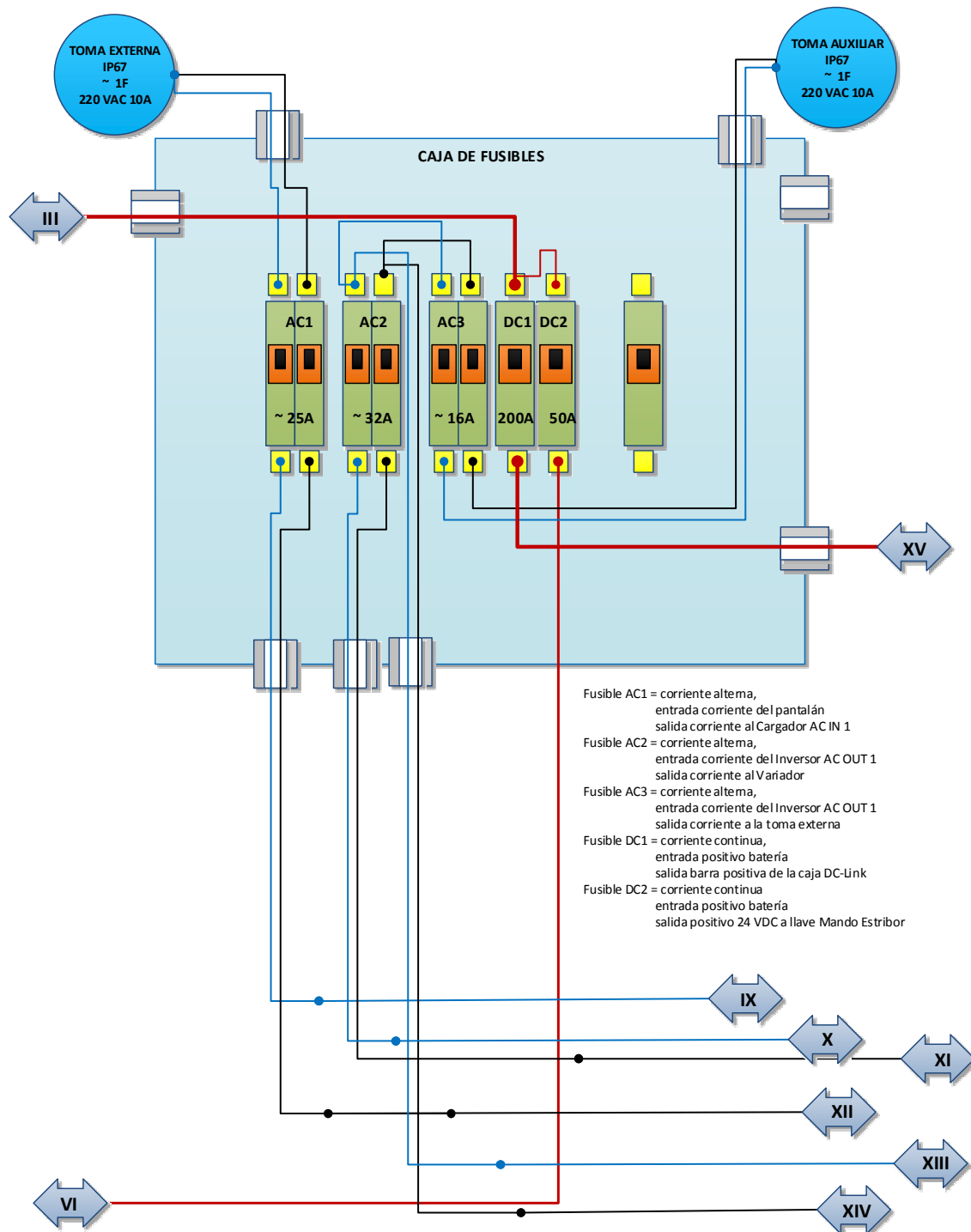


Figura 8.4.- Disposición de la Caja de Fusibles Magnetotérmicos.

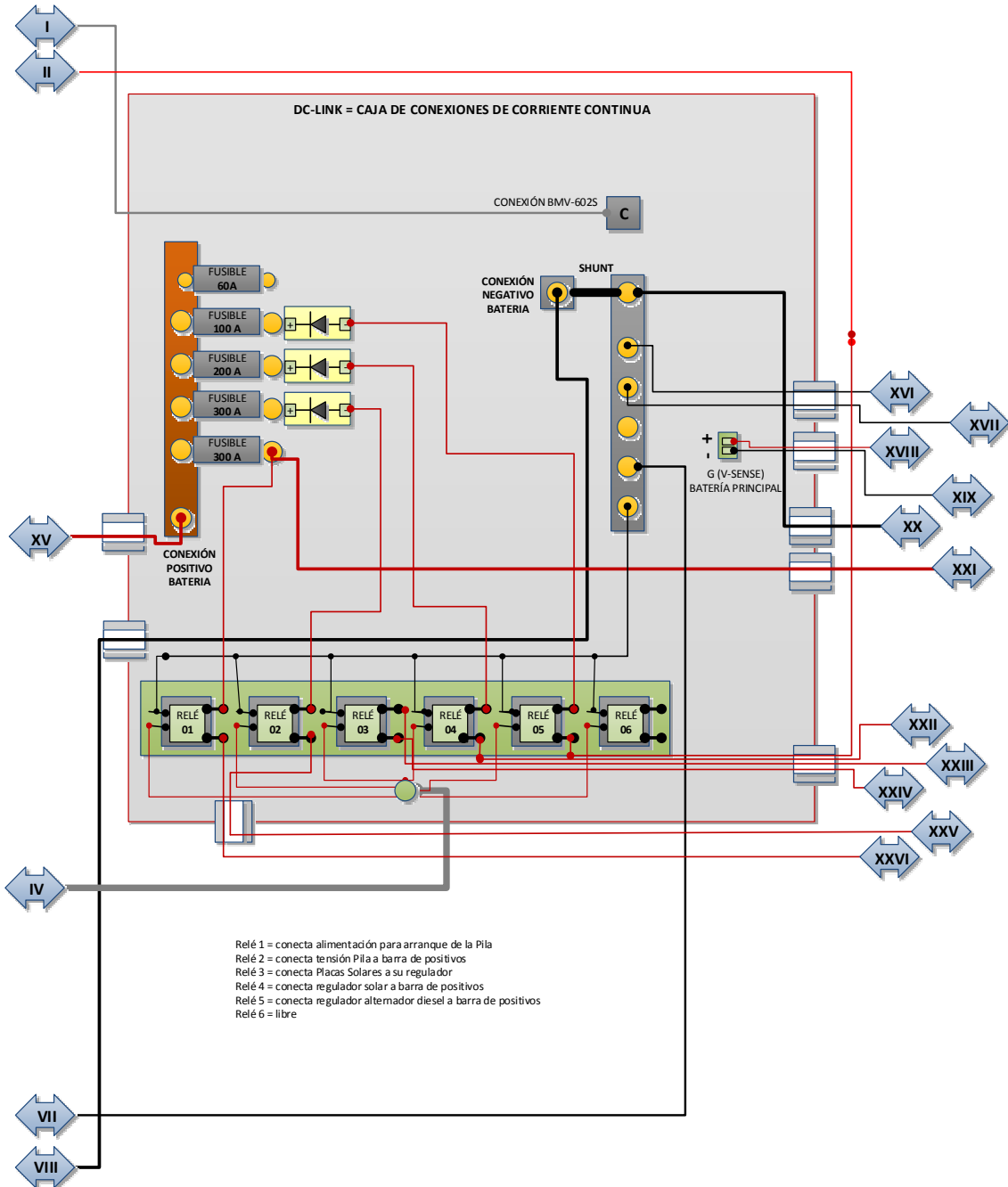


Figura 8.5.- Estructura de la caja de conexiones DC- Link.

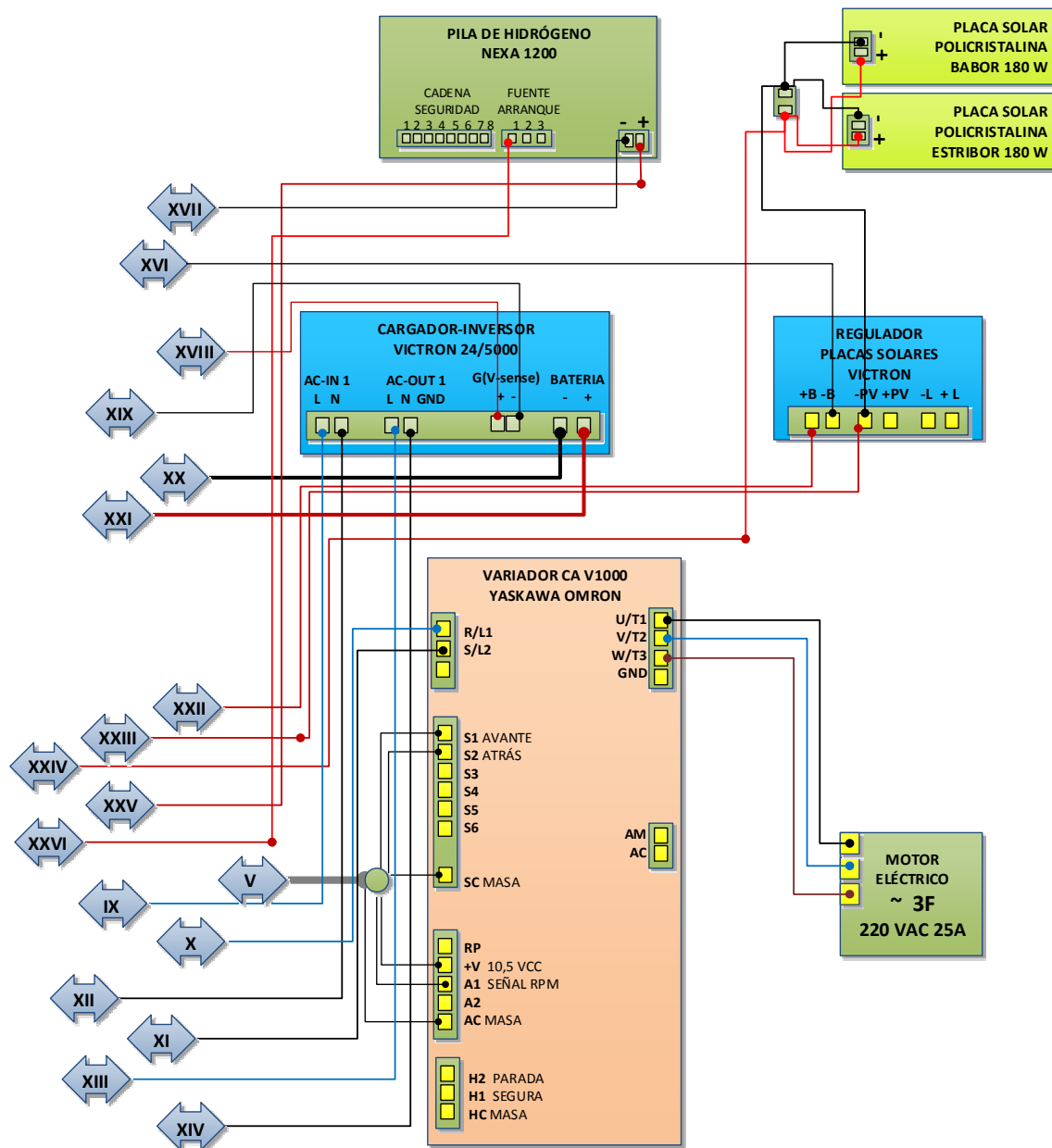


Figura 8.6.- Nueva disposición de las conexiones del cargador inversor, del sistema de energía solar, de la pila de combustible PEM y del variador de corriente.

Por tanto, debido a todas estas modificaciones, nos vemos obligados a recablear de nuevo toda la instalación, aprovechando para mejorar y optimizar todas las conexiones, mediante una mejor canalización, empleo de enchufes rápidos así como uniones con faston, que faciliten las operaciones de extracción del guardacalor y desmontaje del panel de mando.

Otra reforma interesante, sería la incorporación a la embarcación de una tablet, o mini ordenador, que nos permitiera visualizar el software de la pila en todo momento, para el control de las variables de la misma, ya que actualmente lo que estamos empleando es un ordenador portátil, que se encuentra demasiado expuesto a los balances, la humedad marina y los golpes de mar.

A la vez que se van a realizar estas mejoras en la parte de la gestión eléctrica de la embarcación, también está previsto como ya se ha comentado anteriormente en el apartado de conclusiones, mejorar la accesibilidad al motor diesel y al alternador acoplado al mismo, para facilitar la inspección y el mantenimiento del mismo, sin necesidad de tener que extraer el guardacalor.

Otra de las mejoras que queda pendiente, es la mejora del sistema de almacenamiento de combustible. Si como se prevé, la implantación de pilas de combustible PEM de hidrógeno de una manera generalizada en el mundo de la automoción es un hecho ya a corto plazo, en concreto hay fabricantes que pretenden comercializar sus vehículos con este sistema para el año 2015, esto traerá como consecuencia la aparición de una mejora en la infraestructura para el repostaje de los mismos, con la aparición de un mayor número de hidrógenas. Esto, nos podría permitir sustituir la botella de hidrógeno actualmente integrada en la embarcación, por un tanque, lo que implicaría una mayor facilidad de carga, además de poder salir a navegar con la totalidad de la autonomía. Si esto sucede, otra de las consecuencias directas, será la bajada del precio del hidrógeno, debido al mayor aumento de consumo y a las mejoras implantadas para su obtención.

Con todas las acciones anteriores llevadas a cabo en el "Barco 00", el siguiente paso, sería implantar esta tecnología en la náutica de recreo, en concreto integrar un sistema de pila de combustible y de paneles solares en un velero, sustituyendo de este modo la propulsión convencional empleada (motor de combustión), para las maniobras o los momentos en que hay escasez de viento. Con esto obtendríamos una embarcación con cero emisiones contaminantes, tanto ambientales como acústicas.

No obstante, el llevar a buen puerto este último proyecto, implicaría el realizar el desarrollo completo del mismo bajo la supervisión de una sociedad de clasificación, como ya se menciona en el apartado anterior de conclusiones, de manera que nos certificara la seguridad de la embarcación y nos permitiera la homologación de la misma.

Referencias Bibliográficas.

- BIBLIOGRAFÍA ESCRITA.

- G. Arnold, Advanced Hydrogen Storage Technologies, General Motors Hydrogen Storage and Refueling, Global Alternative Propulsión Center.
- R. Young, B. Chao, V. Myasnikov, B. Huang, S.R. Ovshinsky. A Hydrogen ICE Vehicle Powered by Ovonic Metal Hydride Storage, SAE paper 04-606.
- G. Eklund, O. von Krusentierna. Storage and transportation merchant hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy*, 8, 463-470, 1983.
- G.D. Berry, S.M. Aceves. Onboard storage alternatives for hydrogen vehicles. *Energy & Fuels*, 12, 49-55, 1998.
- N. Eliaz, D. Eliezer, D. Abramov, D. Zander, U. Köster. Hydrogen evolution form Zr-based amorphous and quasicrystalline alloys. *J. Alloys & Compounds*, 305, 272-281, 2000.
- J.M. Joubert, M. Latroche, A. Percheson-Guegan A. Metallic-hydrides II: materials for electrochemical storage. *MRS Bulletin*, 27, 694-698, 2002.
- F.H. Yang, R.T. Yang. Ab initio molecular orbital study of adsorption of atomic hydrogen on graphite: insight into hydrogen storage in carbon nanotubes. *Carbon*, 40, 437-444, 2002.
- J. Petrovic, Advanced concepts, Presentation of breakout group, Hydrogen Storage Workshop Proceeding, Agosto 2002.
- R. Young. Current Status of Solid Hydrogen Storage, Texaco Ovonic Hydrogen Systems presentation at the Hydrogen: Fueling the Clean Air Future, Palm Desert, California, August 2004.
- N. Texier-Mandoki, J. Dentzer, T. Piquero, S. Saadallah, P. David, C. Viz-Guterl. Hydrogen storage in activated carbon materials: the role of the nanoporous texture. *Carbon*, 42, 2735-2743, 2004.
- M. Hirscher, B. Panella. Nanostructures with high surface area for hydrogen storage. *J. of Alloys & Compounds*, 404-406, 399-404, 2005.

- A. Burke, M. Gardnier, Hydrogen Storage Options: Technologies and comparisons for light duty vehicle applications, Paper UCD-ITS-RR-05-01, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis 2005.
- H. Jim, Y. Seak Kee, I. Hong. Hydrogen adsorption characteristics of activated carbon. Catalysis Today, 120, 399-406, 2007.
- M. Jordá-Beneyto, F. Suarez-Garcia, D. Lozano-Castello, A. Linares-Solano, D. Cazorla-Amoros. Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressures. Carbon, 45, 293-303, 2007.
- David Antuña Baragaño, Diseño de Sistema de Potencia auxiliar para embarcaciones con Pila de Membrana de Intercambio de Protones. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Diciembre 2008.
- Ángel Lobo Fernández, Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas de Pila de Combustible de Hidrógeno tipo P.E.M. (Membrana de Intercambio de Protones). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo. Julio 2010.
- D. Pedro Revuelta Rodríguez, Estudio de Curvas Características de Pila de Combustible de Hidrógeno de Tipo P.E.M. (Membrana de intercambio de protones). Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Septiembre 2010.
- Ramón Lucio Rubio López, Ensayo Pila de Combustible Tipo PEM para Embarcación Cero Emisiones. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Septiembre 2011.

- CONSULTAS EN LA RED.

- <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/>
- <http://www.fuelcells.org.au/Fuel-Cell-Education.htm>
- <http://www.boeing.es>
- <http://www.imo.org>
- <http://www.aeh2.org>
- <http://www.Ballard.com>

- <http://www.iea.org>
- <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/>
- <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report07/ppts/III%20I%C3%B1aki%20Azk%C3%A1rate%20INASMET.pdf>
- http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/951/1/expo_nano.pdf
- <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.2+Almacenamiento+del+Hidr%C3%B3geno.pdf>
- <http://forococheselectricos.com/2013/07/precio-hidrogeno-hyundai-itm-power.html>
- <http://www.lne.es/gijon/2010/06/25/idesa-trabaja-tanque-acero-almacenamiento-hidrogeno/933888.html>
- <http://www.es.airliquide.com/es/oferta-air-liquide/hydrogen-energy.html#.UnVVyxBlrIU>
- <http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf>
- <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/2185/tesisUPV2623.pdf>
- http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6972/PFC_Lara_Aguilera_Escobar.pdf;jsessionid=67EFEA7C6F1876FDAF4166E770BD4DF8?sequence=1
- http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/9479/PFC_AngelLuis_Rubio_Garcia-Caro_.pdf?sequence=1
- http://www2.cab.cnea.gov.ar/ieds/hyfuseen_2011/extras/trabajos/03-213.pdf
- http://www.energia.jcyl.es/web/jcyl/Energia/es/Plantilla100/1259395684999/11/_/_?plantillaObligatoria=PlantillaComponenteListado
- http://www.ventusciencia.com/pdfs/catalogo_pilash2_completo.pdf

- <http://www.lancea.es/proyectos-rendimiento-energetico/proyectos-pila-combustible/>
- http://unctad.org/es/Docs/rmt2011_sp.pdf
- http://unctad.org/es/PublicationsLibrary/rmt2012_es.pdf
- http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/4252/1/TA1_pp_Schn_Schneider.pdf
- <http://www.ipen.org.br/downloads/XIX/SYMMISSEL/Alberto%20G%C3%B3mez.pdf>
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13729/1/proyecto%20encarnacion%202012.pdf>
- http://www.energylab.es/fotos/120713113139_r6Ye.pdf
- <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/08/110831093919.htm>
- <http://www.motordehidrogeno.net/>